



**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет: Теплоенергетичний

Кафедра: Теоретичної і промислової теплотехніки

Рівень вищої освіти : – другий (магістерський)

Спеціальність: 144 «Теплоенергетика»,

ОНП «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Геннадій ВАРЛАМОВ  
(підпис) (ім'я, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту  
Вовченку Дмитру Івановичу**

**1. Тема дисертації: «Система теплозабезпечення ТРЦ «OASIS» (м.Київ) на базі водневого контактного теплогенератора»**

науковий керівник дисертації: проф., д.т.н. Варламов Геннадій Борисович  
затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

**2. Термін подання студентом дисертації 15.05.2020 р.**

**3. Об'єкт дослідження:** Процеси спалювання водневого палива та теплопередачі у контактному теплогенераторі типу ТВАК

**4. Предмет дослідження:** Вплив конструктивних характеристик пальника та контактної насадки у теплогенераторі на енерго-екологічні показники енергогенерування з використанням водневого палива.

**5. Перелік завдань, які потрібно розробити:**

5.1. Ознайомлення з об'єктом для подальшої розробки системи теплозабезпечення;

5.2. Визначення основних конструктивних та аеродинамічних характеристик контактного теплогенератора;

5.3. Теплові розрахунки системи теплозабезпечення, витрати водневого палива, підбір типу електролізера;

5.4. Розробка принципової схеми живлення джерела генерування водню;

5.4. Моделювання процесу горіння водню в топці контактного теплогенератора;

5.5. Техніко-економічні розрахунки системи теплозабезпечення з використанням ТВАК в порівнянні з газовою котельнею.

**6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:**

6.1. Принципова схема теплозабезпечення на базі контактного водневого теплогенератора;

6.2. Загальний вигляд водневого теплогенератора ТВАК;

6.3. Модель камери згоряння контактного теплогенератора;

6.4. Результати 3D моделювання. Розподіл температурного поля. Швидкість димових газів у топці теплогенератора.

**7. Орієнтовний перелік публікацій:**

Стаття у фаховому журналі; тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

**8. Консультанти розділів дисертації\***

Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Мат. моделювання	Андрій СОЛОМАХА, доцент		

**9. Дата видачі завдання: 13 березня 2020р.**

**Календарний план**

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Ознайомлення з об'єктом, для подальшої розробки системи теплозабезпечення	20.03.20 р.	
2	Літературний огляд	27.03.20 р.	
3	Визначення основних конструктивних та аеродинамічних характеристик контактного теплогенератора	08.04.20 р.	
4	Розрахунок основних параметрів мікрофакельного пальника дифузійного типу	16.04.20 р.	
5	Розрахунок витрати водневого палива та підбір електролізера	23.04.20 р.	
6	Теплотехнічний розрахунок ТВАК	28.04.20 р.	
7	Моделювання теплових та аеродинамічних процесів	01.05.20 р.	
8	Техніко-економічний розрахунок системи теплозабезпечення ТРЦ з використанням ТВАК в порівнянні з газовою котельнею	11.05.20 р.	
9	Оформлення та подання дисертації	15.05.20 р.	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Дмитро ВОВЧЕНКО  
(ім'я, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Геннадій ВАРЛАМОВ  
(ім'я, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня магістра за освітньо-науковою програмою підготовки на тему «Система теплозабезпечення ТРЦ «OASIS» (м.Київ) на базі водневого контактного теплогенератора»: 69 с., 32 рис., 4 табл., 4 додатки, 14 джерел.

Об'єкт дослідження – водневий контактний теплогенератор для системи теплозабезпечення торгівельного центру.

Мета роботи – підвищення екологічних показників енерговиробництва та зменшення собівартості теплозабезпечення торгівельного центру за рахунок спалювання екологічно чистого водневого палива.

Робота присвячена теплозабезпеченню ТРЦ за допомогою контактного теплогенератора. На підставі аналізу основних типів конструкцій контактного теплогенератора та особливостей водо-хімічного режиму було визначено їх переваги та недоліки та обрано основний прототип.

Проведений огляд особливостей водню, класифікації методів та устаткування водню та визначення основних понять спалювання водню дозволили визначити основне устаткування для генерування водню. В якості генератора водню в даній роботі використовувався електролізер.

На підставі наданих теплових навантажень було визначено необхідну величину теплової потужності джерела для теплозабезпечення торгівельного центру. Розроблено теплову схему, визначено характеристики теплогенератора та виконано підбір обладнання. Було розроблено принципову схему живлення джерела генерування водню.

За допомогою створеної математичної моделі у програмному середовищі SOLIDWORKS здійснене моделювання теплових та аеродинамічних характеристик у топковій камері теплогенератора. Виконано розрахунок променевого та конвективного теплообміну. Також були визначені конструктивні особливості та аеродинамічні характеристики мікрофакельного пальника.

Проведено техніко-економічний розрахунок системи теплозабезпечення ТРЦ з використанням ТВАК в порівнянні з газовою котельнею. Передбачені заходи з охорони праці.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** теплогенератор, моделювання, водень, теплозабезпечення, пальник, електролізер.

## **REPORT**

Master's thesis for a master's degree in educational and scientific training program on the topic "Heat Supply System of Shopping Mall "Oasis"(Kiev) based on a hydrogen contact heat generator" : 69 p., 32 Fig., 4 table., 4 appendices, 14 sources.

The object of research is a hydrogen contact heat generator for the shopping center's heat supply system.

The purpose of the work is to increase the environmental indicators of energy production and reduce the cost of heating the shopping center by burning environmentally friendly hydrogen fuel.

The work is devoted to the heat supply of the shopping center using a contact heat generator. Based on the analysis of the main types of structures of the contact heat generator and the features of the water-chemical regime, their advantages and disadvantages were determined and the main prototype was selected.

A review of the features of hydrogen, classification of methods and equipment of hydrogen and the definition of the basic concepts of hydrogen combustion allowed to determine the main equipment for generating hydrogen. An electrolyzer was used as a hydrogen generator in this work.

Based on the provided heat loads, the necessary amount of heat power of the source for the heat supply of the shopping center was determined. The heat scheme was developed, the characteristics of the heat generator were determined, and the selection of equipment was performed. A schematic diagram of the power supply for the hydrogen generation source was developed.

Using the created mathematical model in the SOLIDWORKS software environment, thermal and aerodynamic characteristics were simulated in the furnace chamber of the heat generator. The calculation of radiation and convective heat transfer is performed. The design features and aerodynamic characteristics of the microfakel burner were also determined.

The technical and economic calculation of the heat supply system of the shopping center using TVAK in comparison with a gas boiler house is carried out. Labor protection measures are provided.

**KEYWORDS:** heat generator, modeling, hydrogen, heat supply, electrolyzer burner.

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на соискание степени магистра по образовательно-научной программе подготовки на тему «Система теплообеспечения ТРЦ «OASIS» (г.Киев) на базе водородного контактного теплогенератора»: 69 с., 32 рис., 4 табл., 4 приложения, 14 источника.

Объект исследования — водородный контактный теплогенератор для системы теплоснабжения торгового центра.

Цель работы — повышение экологических показателей энергопроизводства и снижения себестоимости теплоснабжения торгового центра за счет сжигания экологически чистого водородного топлива.

Работа посвящена теплообеспечению ТРЦ с помощью контактного теплогенератора. На основании анализа основных типов конструкций контактного теплогенератора и особенностей водо-химического режима были определены их преимущества и недостатки и выбран основной прототип.

Проведен обзор особенностей водорода, классификации методов и оборудования водорода и определения основных понятий сжигания водорода позволили определить основное оборудование для генерирования водорода. В качестве генератора водорода в данной работе использовался электролизер.

На основании предоставленных тепловых нагрузок была определена необходимая величина тепловой мощности источника для теплообеспечения торгового центра. Разработана тепловая схема, определены характеристики теплогенератора и выполнен подбор оборудования. Была разработана принципиальная схема питания источника генерирования водорода.

С помощью созданной математической модели в программной среде SOLIDWORKS осуществлено моделирование тепловых и аэродинамических характеристик в топочной камере теплогенератора. Выполнен расчет лучевого и конвективного теплообмена. Также были определены конструктивные особенности и аэродинамические характеристики микрофакельной горелки.

Проведен технико-экономический расчет системы теплоснабжения ТРЦ с использованием ТВАК в сравнении с газовой котельной. Предусмотрены мероприятия по охране труда.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** теплогенератор, моделирование, водород, теплообеспечение, горелка, электролизер.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень, термінів.....	7
Вступ .....	8
1 Основні дані про торгівельно-розважальний центр «OASIS» .....	9
1.1 Загальні дані ТРЦ .....	9
1.2 План та опис котельні системи теплозабезпечення .....	11
2 Теплова схема та умови теплозабезпечення центру .....	13
2.1 Особливості основного джерела теплозабезпечення .....	13
2.2 Теплова схема теплозабезпечення .....	24
3 Загальні особливості застосування водневого палива в теплогенераторі типу «ТВАК» .....	26
3.1 Конструктивні особливості ТВАК .....	26
3.2 Загальні особливості та характеристики спалювання водню у ТВАК .....	29
3.3 Розрахунок основних параметрів мікрофакельного пальника дифузійного типу .....	30
3.4 Моделювання теплових та аеродинамічних процесів .....	32
3.5 Теплотехнічний розрахунок ТВАК .....	35
4 Опис системи генерування водню для теплозабезпечення центру .....	42
4.1 Загальні відомості принципу генерування водню .....	42
4.2 Особливості електролізерного виробництва водню .....	46
4.3 Розрахунок витрати водневого палива та підбір джерела генерування водню .....	53
4.4 Принципова схема живлення джерела виробництва водню .....	55
4.5 Основні техніко-економічні розрахунки системи теплозабезпечення з використанням ТВАК .....	57
ВИСНОВКИ .....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	62
Додатки	
Додаток А	
Технічне завдання на науково-дослідну роботу .....	64
Додаток Б	
Акт впровадження результатів магістерської дисертації .....	66
Додаток В	
Список наукових праць і творчих досягнень .....	67
Додаток Г	
Результати перевірки на плагіат .....	69

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

### Умовні позначення

$W$  – швидкість в отворах пальника;

$Q$  – кількість теплоти;

$\lambda$  – теплопровідність;

$t$  – температура;

$Re$  – число Рейнольдса;

$Pr$  – число Прандля;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності газів у топковій камері;

$f$  – площа поперечного перерізу;

$l$  – ефективна довжина факелу;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;

$m$  – масова витрата;

$\omega$  – швидкість;

$C$  – вартість тепловиробництва;

індекси нижні:

$H_2$  – водень;

$p$  – рідина;

$vx$  – вхід;

$вих$  – вихід;

газ – димові гази;

$кф$  – від димових газів до стінок топки;

$пр$  – приведений;

$г$  – газ;

$w$  – оболочка;

$пр.газ$  – природний газ;

$оп$  – опалювальний сезон;

індекси верхні:

$тр$  – трубки;

$ел.ен$  – електрична енергія;

скорочення:

ТВАК – теплогенератор водневий контактний;

ТРЦ – торгівельно-розважальний центр



## ВСТУП

На даний момент у промисловості та комунальній сфері України дуже гостро повстало питання економії енергоресурсів у зв'язку із стрімким подорожчанням енергоресурсів. Усі системи теплозабезпечення будівель можна поділити на два види: централізовані та децентралізовані. Станом на сьогодні, більша частина теплової енергії у великих містах підводиться централізованими система теплозабезпечення.

Однак, більшість обладнання систем централізованого теплозабезпечення стало морально і фізично застарілим, що призводить до не ефективної експлуатації всієї системи. Одночасно з цим, такі системи мають розгалужені і протяжні теплові мережі, більша частина яких потребує капітального ремонту або взагалі знаходиться у аварійному стані, мають великі теплові втрати. Сукупність цих факторів унеможлиблює якісне надання послуг споживачам і мобільно реагувати на зміни зовнішнього ринку та потреби клієнтів.

Ці недоліки серйозно впливають на якість і вартість наданих послуг для окремих будівель, приватних будинків та торгівельно-розважальних центрів.

Тому актуальним є створення індивідуальних та автономних теплових джерел та систем теплозабезпечення.

Однією з автономних систем теплозабезпечення торгівельно-розважального центру є система на базі водневого теплогенератора типу ТВАК. Завдяки використанню прихованої теплоти конденсації водяних парів із продуктів згоряння, така система може мати ККД на 12% в перерахунку на нижчу теплоту згоряння в порівнянні зі звичайними котлами.

Високий ККД установки, компактність, простота конструкції та експлуатації, низька металоємність та інтенсивність тепломасообміну зумовлюють перспективність широкого впровадження водопідігрівачів контактного типу, в яких тепломасообмін здійснюється при безпосередньому контакті продуктів згоряння та води. Існуючі конструкції контактних теплогенераторів можуть нагрівати воду до 90-95°C і використовуватися в багатьох галузях промисловості, а також для опалення та гарячого водопостачання великих торгівельних центрів.

## 1 ОСНОВНІ ДАНІ ТОРГІВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНОГО ЦЕНТРУ «OASIS»

### 1.1 Загальні дані ТРЦ

Торгівельний центр «OASIS» розташований за адресою м. Київ, вул. Героїв Дніпра, буд. 30. серед одноманітних будівель району. Кругла будівля торговельного центру розташована на дорожньому кільці та знаходиться над станцією метро "Героїв Дніпра", чотири виходи з якого пов'язані з торговим центром. Загальна площа ТРЦ становить 14 481 м<sup>2</sup>. За даними NAI Ukraine, щоденний потік в районі метро понад 100 000 чоловік на добу. На рис. 1.1 показано загальний план ТРЦ.

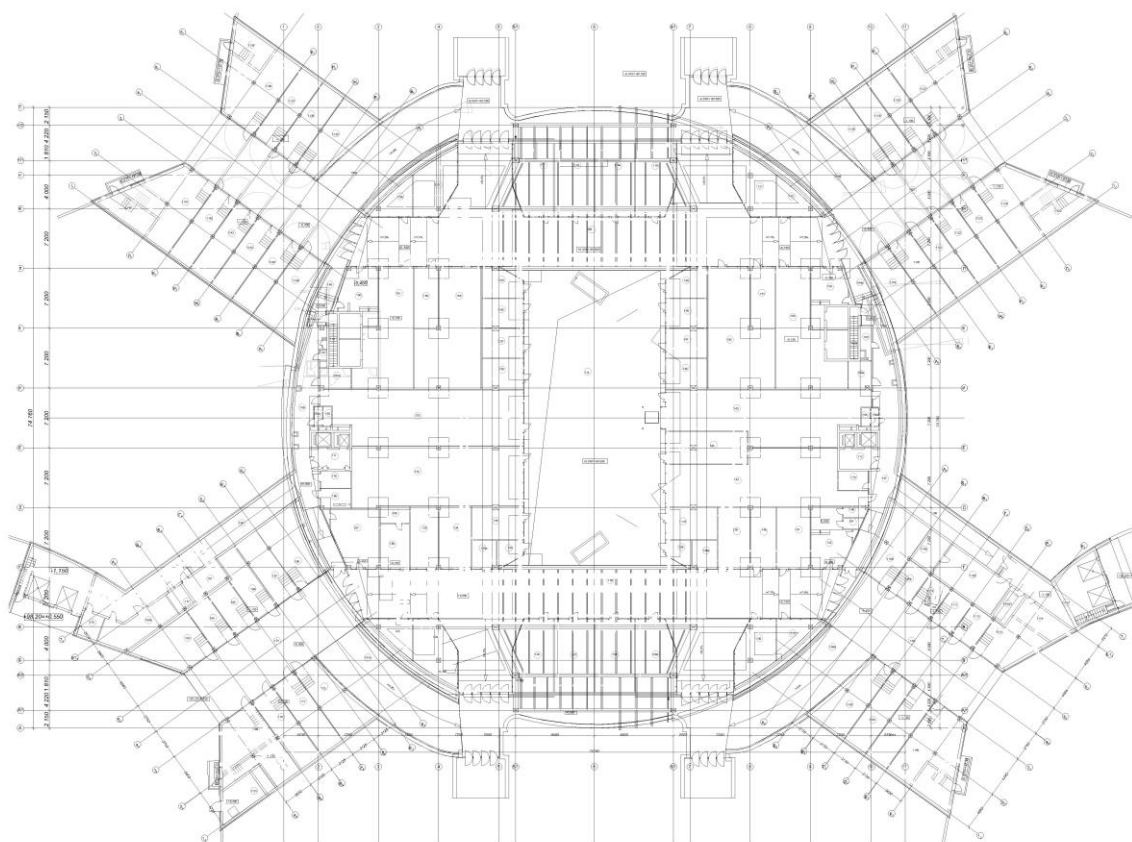


Рисунок 1.1 – План першого поверху на відм. 0.000



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд торговельного центру

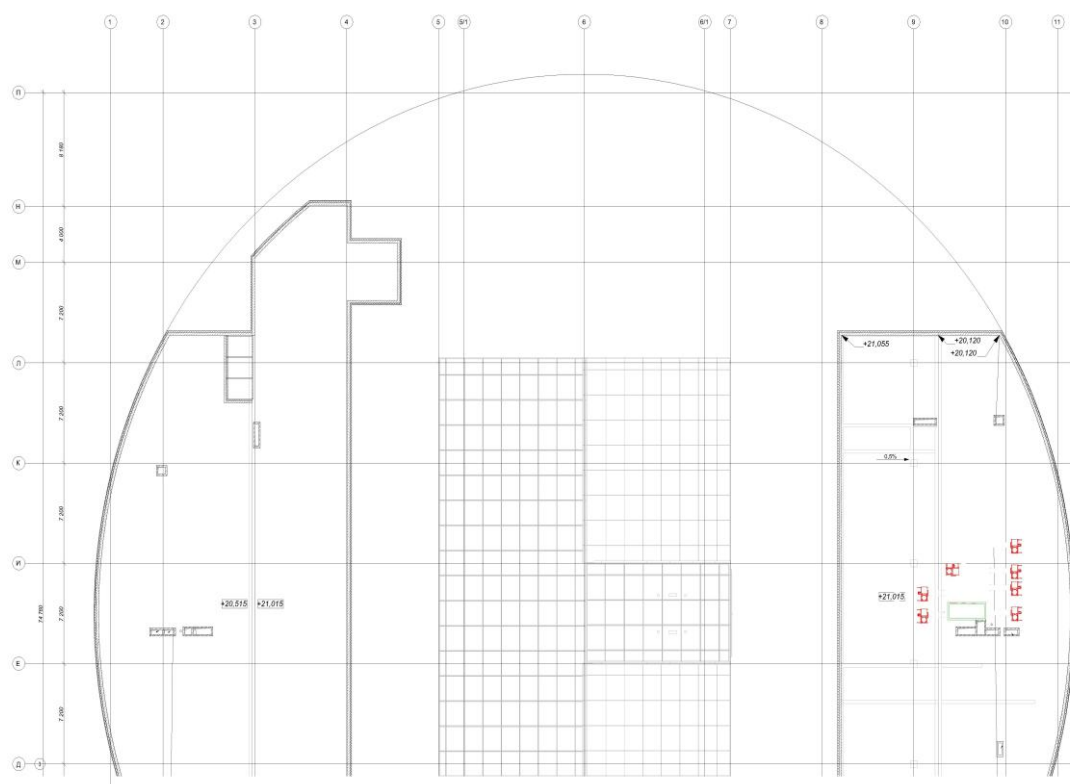


Рисунок 1.3 – План покрівлі на відм. +16.500

## 1.2 План та опис котельні системи теплозабезпечення

Приміщення котельні розташовано на четвертому поверху ТРЦ у вісях 1-3/Л-К. Площа котельні становить 57,92 м<sup>2</sup>, висота – 3,5 м. На рис. 1.4 показано план котельні.

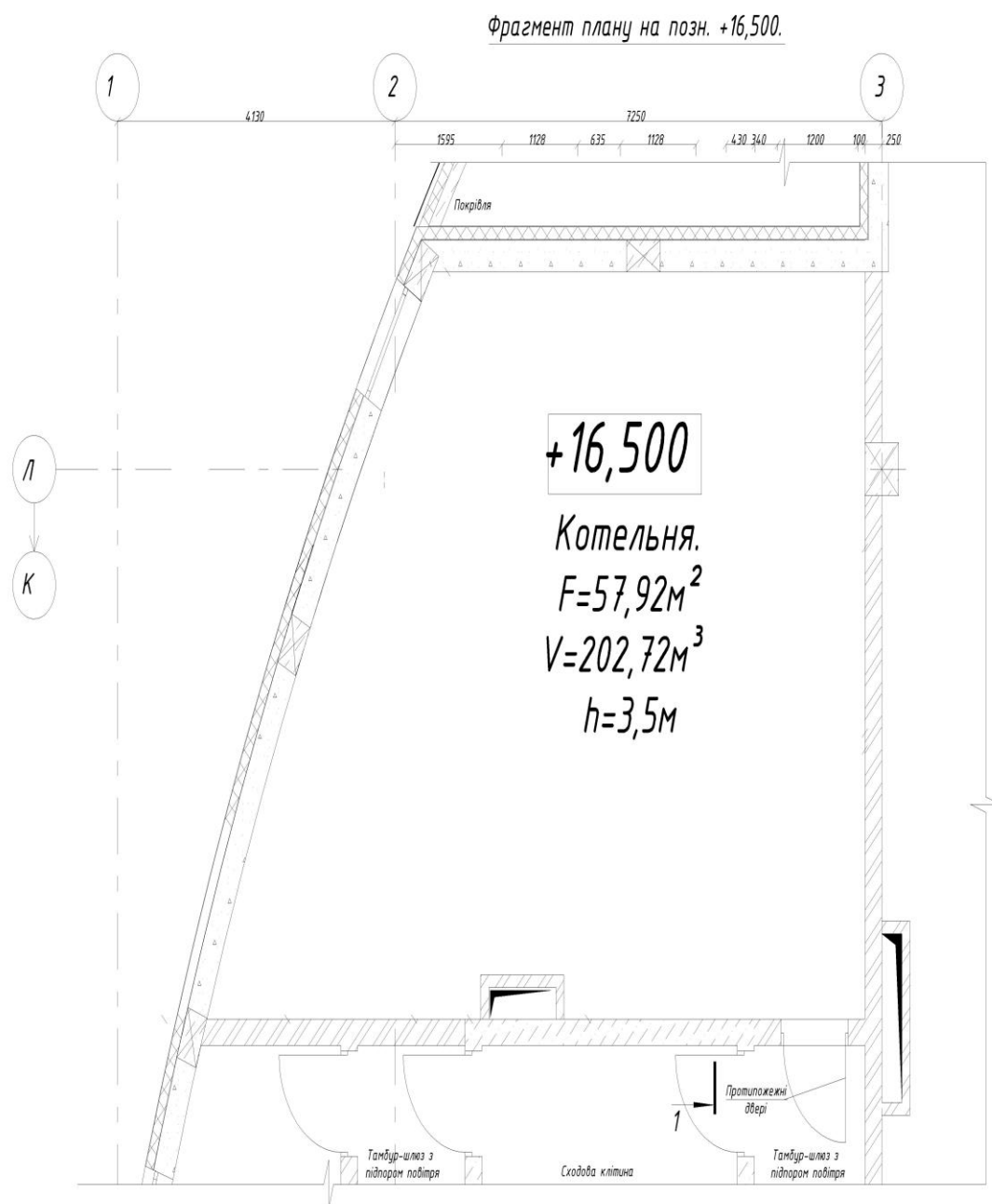


Рисунок 1.4 – План котельні на відм. +16.500



Рисунок 1.5 – Фрагменти котельні, відм. +16.500



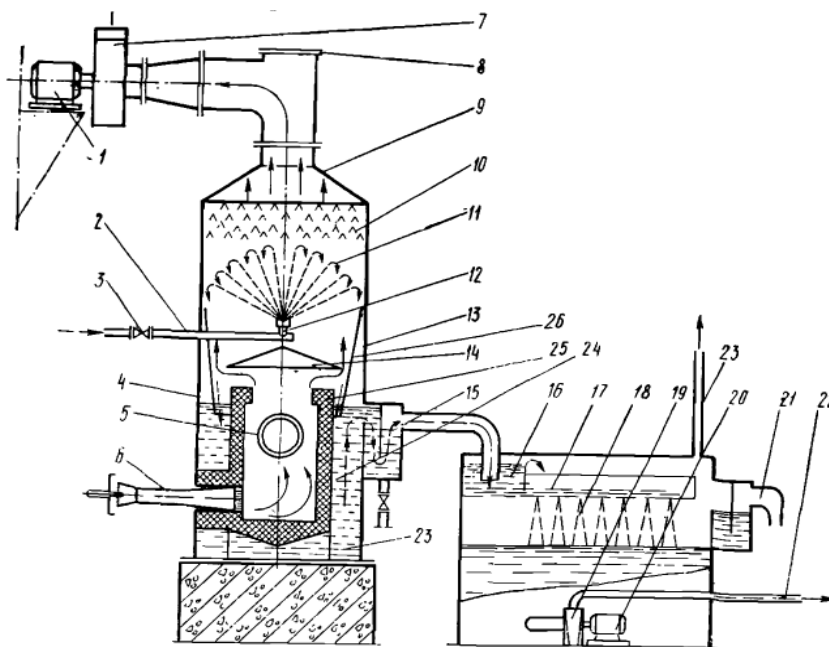
Рисунок 1.6 – Фрагмент вузла керування котельнею на відм. +16.500



## 2 ТЕПЛОВА СХЕМА ТА УМОВИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦЕНТРУ

### 2.1 Особливості основного джерела теплозабезпечення

Конструкцію газового контактного водонагрівача зі збірним баком показано на рисунку 2.1 [1].



1 – електродвигун вентилятора; 2-труба для подачі холодної води в форсунку; 3-засувка; 4- металева зовнішня поверхня; 5-вибухопопереджувач; 5 - клапанів топці; 6-газовий пальник середньоготиску типу ІГК; 7-низьконапірний вентилятор типу ЕРЗ; 8-вибухопопереджувальний клапанв димарі; 9-коєфузор; 10 – краплевідділювач (бризковловлювач); 11- водяний факел відцентрової форсунки; 12 – відцентрова форсунка; 13-металевий кожух контактної камери;14 – надтопочний диск; 15- гідравлічний затвор на виході гарячої води з апарату; 16- гідравлічний затвор у збірному баку;17-лоток для рівномірного розподілу гарячої води; 18- струмінь гарячої води;19 – відцентровий водяний насос; 20-електродвигунвідцентрового насосу; 21 – переливна лінія з гідравлічним затвором; 22 – вихід гарячої води до споживача; 23 - трубка, що з'єднує збірний бак з атмосферою; 24 – збірник гарячої води апарату; 25-вогнетривка футеровка топки; 26 - внутрішній конус

Рисунок 2.1 - Принципова схема газового контактного водонагрівача зі збірним баком

Принцип дії контактного водонагрівача полягає в наступному. Продукти згоряння газового палива, що виникають в топці, обтікають надтопочний диск і знизу входять в контактну камеру. Холодна вода подається назустріч газовому потоку. Спосіб подачі холодної води залежить від типу застосовуваної контактної камери. Маса холодної води поступає на форсунку, встановлену у нижній зоні контактної камери. Продукти згоряння, що

виходять з топки, охолоджуються з 1200 - 1500°C до 35-45°C. Охолоджений потік газів проходить через краплевідділювач і викидається в атмосферу. Вода, нагріта в контактній камері до 75-80 °C, під дією сили тяжіння потрапляє на надтопочний диск і стікає в збірник апарату, де нагрівається ще на 6-8 °C за рахунок припливу тепла через стінки футерованої топкової камери. Далі, минаючи гідравлічний затвор, вода самопливом стікає в збірний бак, з якого відцентровим насосом подається споживачам [1].

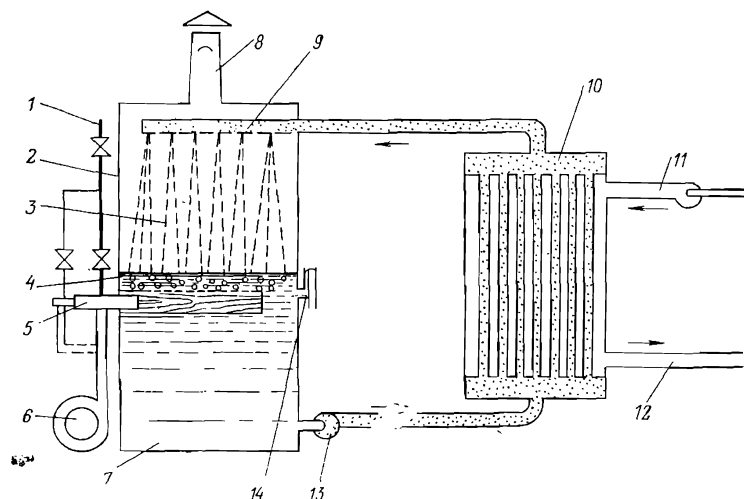
Збірний бак забезпечений водомірним склом, за яким оператор стежить за рівнем води. Якщо рівень води падає, то оператор збільшує витрату газу, що надходить, і відповідно подачу води на форсунки. Одночасно він контролює температуру води у збірнику апарату, коли рівень в баку піднімається і підходить до контрольної точки, оператор відповідно збавляє витрату газу і води на апарати або вимикає один або два водонагрівача. Якщо вода піднімається в баку вище контрольної лінії, а оператор не знижує теплове навантаження контактних апаратів, то гаряча вода починає з бака надходити в переливну трубу і потім в каналізаційну лінню. Таким чином забезпечується безпека експлуатації.

На рисунку 2.2 зображений контактний водонагрівач, розроблений у Франції [1].

Спалення природного газу відбувається в малогабаритному топковому пристрої, з якого розпечені продукти згоряння під деяким тиском викидаються в горизонтальну трубу, що має отвори у верхній зоні. Труба встановлена з таким розрахунком, щоб її вихідні отвори розташовувалися на 100 мм нижче рівня гарячої води.

При виході з отворів потік розпечених газів дробиться на безліч газових бульбашок, що мають велику поверхню контакту з водою. При русі вгору газові бульбашки охолоджуються і віддають своє тепло шару води завтовшки 100 мм. Більш глибоке охолодження продуктів згорання з використанням прихованої теплоти конденсації водяної пари здійснюється у верхній частині корпусу, в якому ефективно працює розприскуючий пристрій. Продукти згорання, що виходять в димохід, мають температуру 46-50 °C. У збірнику апарату температура води може досягати 85 °C. Звідси вода відцентровим насосом подається в водяний теплообмінник. Охолоджуючись там до 35-40°C, вода під тиском того ж відцентрового насоса подається в гребінку розпилювального пристрою.

Водяной теплообмінник служить для нагріву зворотної води, що подається з системи опалення. В даній установці контактного типу чітко виділяються два водяних контури. Первинний контур включає водяну ємність збірника апарату і простір водяного теплообмінника.



1 - газопровід; 2 - корпус водонагрівача; 3 - водяні струмені, створені розбризкуючим пристроєм; 4 - максимальний рівень води в нагрівачі; 5 - занурювальний газовий пальник; 6 - вентилятор, що подає повітря в пальник; 7-збірник гарячої води ; 8 - димова труба з пластинчатим вологовловлювачем; 9 - розбризкувати пристрій; 10 - водяний теплообмінник; 11 - відцентровий насос, що подає для нагріву в теплообмінник зворотну воду системи опалення; 12 - трубопровід, що подає споживачу нагріту в поверхневому теплообміннику воду; 13 - центробіжний насос, що перекачує гарячу воду зі збірника апарату в теплообмінник і далі в гребінку розприскувача; 14 - труба з гідравлічним затвором

Рисунок 2.2 - Контактний водонагрівач, розроблений у Франції

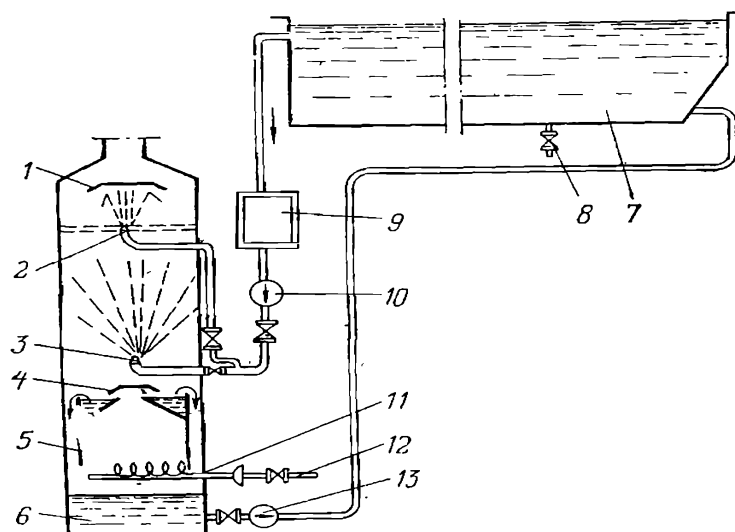
Вторинний контур представляє собою тільки обсяг водяного теплообмінника, заповнений водою з системи опалення. ККД такого контактного водонагрівача дорівнює 92-93%, вважаючи з вищої теплоті згоряння палива. Високий ККД зберігається протягом усього періоду експлуатації, так як в самому водонагрівачі і теплообміннику практично не утворюється накип. У процесі експлуатації апарату в первинному контурі накипу взагалі не може утворюватися, бо збірний контур безперервно підживлюється природнім (конденсатом, який з'являтиметься в результаті конденсації водяної пари з продуктів згорання. Надлишки води зливаються в каналізацію через гідравлічний затвор. З боку вторинного контуру накип також практично не утворюється, оскільки температура нагрівається зворотної води із системи опалення на виході з теплообмінника не перевищує 65-70°C [1].

Контактний водонагрівач з тепловою продуктивністю 1 Гкал / г займає площу 3,5х0,75 м і має вагу 2000 кг. В даний час у Франції експлуатуються більше 50 газових котелень з контактними водонагрівачами. Такі котельні розміщуються на даху. Або останньому поверсі будівлі, при цьому вони повністю ізолюються від внутрішніх приміщень.



Є котельні, що обслуговують групу житлових будинків чи адміністративних будівель. Переваги таких котелень з контактними апаратами полягають у наступному: а) при розташуванні котелень на дахах будівель звільняються підвальні приміщення, які використовуються переважно для гаражів, б) не потрібно спеціальної димової труби; істотно скорочуються обсяг будівельно-монтажних робіт і вартість котельні в цілому; г) допоміжне обладнання котельні (відцентрові водяні насоси, засувки і т. д.) піддається меншому статичному тиску і відповідно збільшується термін його служби.

Останнім часом у Франції контактні газові водонагрівачі стали використовувати для нагріву води в басейнах. На рисунку 2.3 показана схема басейну, вода в якому нагрівається від газового контактного нагрівача [2]. З басейну вода надходить у фільтраційну установку, звідки під тиском відцентрового насоса підходить до форсунок контактного водонагрівача.



1 - відбійник; 2 - верхня форсунка; 3 - нижня водяна форсунка; 4 - над топочний диск, 5 - корпус топки; 6 - збірка гарячої води; 7 - плавальний басейн, 8 - спускний кран; 9 - фільтраційна установка; 10 - центробіжний водяний насос фільтраційної установки; 11 - ежекційний газовий пальник; 12 - газопровід, 13 - центробіжний водяний насос.

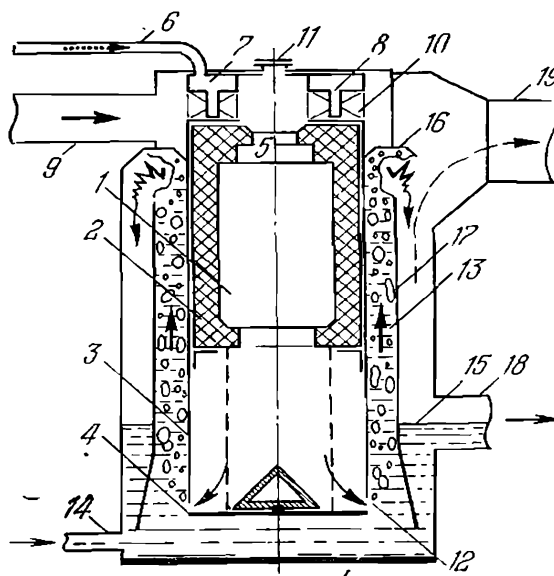
Рисунок 2.3 - Схема нагріву води в плавальному басейні від газового контактного водонагрівача

Форсунками вода рівномірно розбризкується в контактній камері на дрібні краплі. Останні, падаючи вниз і стикаючись з розпеченими продуктами згоряння газового палива, нагріваються і у вигляді цівки гарячої води збираються з збірника апарату. Із збірки контактного водонагрівача гаряча вода, що має температуру приблизно  $40^{\circ}\text{C}$ , перетікає назад в басейн. Такі

апарати призначені головним чином для невеликих басейнів. Недоліком описаної установки є те, що вода басейну безпосередньо контактує з продуктами згоряння газового палива.

Для великих відкритих і закритих басейнів в основному використовуються контактні водонагрівачі з занурюваним пальником і вбудованим теплообмінником (рисунок 6). Основною перевагою такого генератора тепла є висока теплопровідність при відносно невеликих капітальних витратах. Крім того, в цьому контактному теплогенераторі вода безпосередньо не стикається з продуктами згоряння газу. При спалюванні газу в занурюваному пальнику нагрівається вода, що знаходиться всередині корпусу теплогенератора. Температура шару води, що лежить нижче рівня вбудованого теплообмінника, може досягати  $80 - 85^{\circ}\text{C}$ . Продукти згоряння виходять, з корпусу в атмосферу через трубу, а охолоджені конвективні струми води опускаються уздовж стінок корпусу теплогенератора.

Водонагрівач з ерліфтними контактними камерами (рисунок 2.4) рекомендується використовувати в тих областях, де звичайні контактні апарати з ежекційними пальниками не можуть бути використані з технічних причин.



1-камера згоряння; 2- вогнетривкий матеріал; 3-кожух; 4- відбійник; 5- горловина; 6- трубопровід; 7-коробка; 8- трубки з отворами; 9- повітропровід; 10- лопатки; 11- вічко; 12- щілина; 13- ерліфтна камера згоряння; 14- трубопровід холодної води; 15- бак-акумулятор; 16- відбивач; 17- обичайка; 18- дренажний трубопровід;

Рисунок 2.4 - Високопродуктивний водонагрівач з ерліфтною контактною камерою

Камера згоряння 1 футерована зсередини вогнетривким матеріалом 2, який знаходиться всередині металевого кожуху 3, виконаного з нержавіючої сталі. На виході з топки встановлений плоский відбійник 4. У верхній зоні топки знаходиться горловина 5.

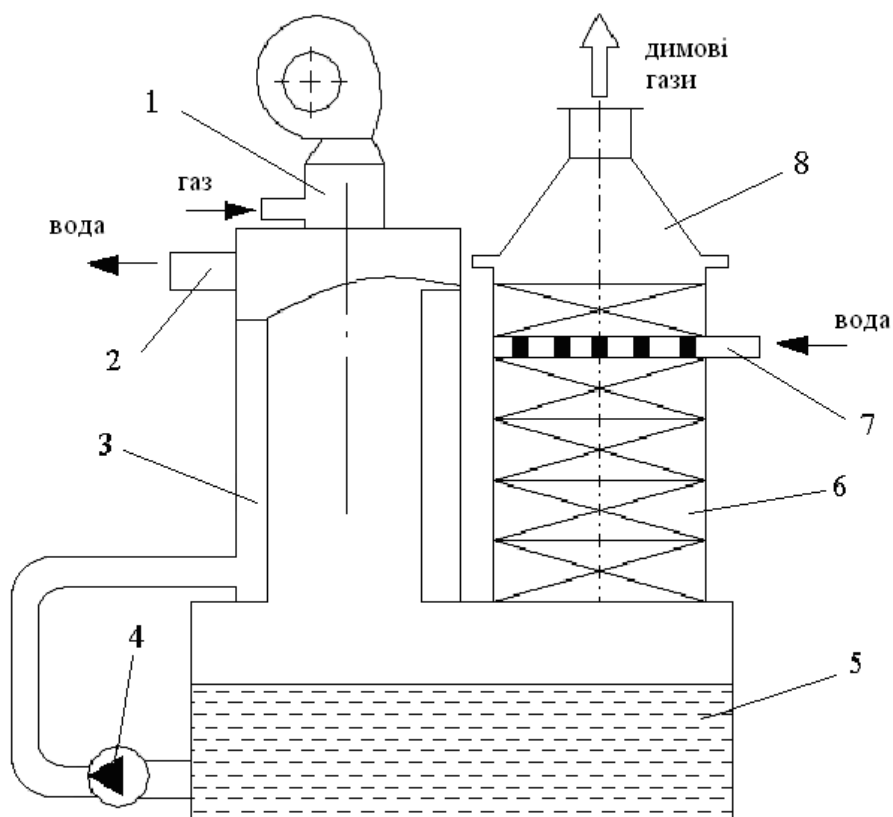
Трубопровід 6 призначений для подачі пального газу в коробку 7. У нижню зону коробки приварені трубки 8 з дрібними отворами. По трубі 9 в топку під тиском подається повітря. Лопатки 10 призначені для з'єднання повітря. Вічко 11 встановлено для спостереження за процесом спалювання газу. Через щілину 12 металевого кожуха високотемпературні гази виходять у ерліфтну контактну камеру 13. У нижню зону апарату приварена труба 14, по якій з водопроводу надходить холодна вода. У збірнику 15 збирається нагріта вода. Відбивач 16 запобігає розбризкування і направляє води тільки вниз. Збірник нагрітої води відділений від ерліфтною камери обичайкою 17, яка в нижній частині має змінний поперечний переріз. Найвищий рівень води в апараті підтримується зливною трубою 18, площа поперечного перерізу якої в 5-6 разів більше труби, що подає холодну воду. По трубі 19 продукти згорання з контактної апарату відводяться в атмосферу. Тиск у повітропроводі створюється одноступінчастим вентилятором типу В (1250 мм вод. ст.).

Контактний водогрійний агрегат КАОМ (розробка Інституту Газу Національної академії наук України) має діапазон потужностей від 0,315 до 1,0 МВт і призначений для систем децентралізованого опалення [1]. Контактні водонагрівальні апарати типу КАОМ принципово відрізняються від поверхневих котлів способом теплопередачі від гарячих газів до води. У цих апаратах нагрів води відбувається шляхом безпосереднього контакту газів з водяною плівкою, що стікає по перфорованій гофрованої насадці (насадка типу Зульцера). Така насадка має високі питомі теплообмінні характеристики -  $300 \text{ м}^3$  поверхні теплообміну в  $1 \text{ м}^3$  обсягу насадки. Така теплообмінна поверхня дозволяє глибоко охолоджувати димові гази, при цьому вести процес з конденсацією водяної пари з продуктів згорання і отримувати додаткову теплоту конденсації.

Принципову схему КАОМ зображено на рис. 2.5.

Такий агрегат поєднує нагрів води через трубчасті поверхні камери згорання з прямим контактом зворотної води і гарячими продуктами згорання. За принципом дії установка аналогічна конденсаційному котлу. Відмінністю є те, що конденсація пари з продуктів згорання відбувається в контактній насадці. В якості традиційних матеріалів для контактної насадки використовуються керамічні шарики, кільця Рашига, металічна стружка, сітки. Однак, найбільш ефективною є регулярна насадка, створена перфорованими гофрованими тонкими металевими листами [2].

При спалюванні 1 кг природного газу в котлі утворюється більше 2 кг води за рахунок окислювання водню метану. Точка роси для продуктів згорання природного газу при теоретичному співвідношенні газ/повітря складає  $53^\circ\text{C}$ .



1 – блочний газовий пальник; 2 – патрубок нагрітої води; 3 – водоохолоджувальна топочна камера; 4 – насос циркуляційний; 5 – бак водяний; 6 – контактна камера; 7 – патрубок подачі води; 8 – вихлопний патрубок

Рисунок 2.5 – Принципова схема теплогенератора типу КАОМ

При температурі зворотної сітьової води близько 50 °С відбувається конденсація водяної пари з продуктів згорання і тим самим реалізація вищої теплоти згорання палива. Різниця між нижчою і вищою теплотою згорання складає приблизно 11%. Це, потенціал підвищення ефективності котлів, наданий самою природою. ККД конденсаційних (контактних) установок по вищій теплоті згорання дорівнює 94...96%.

Конденсат парів води, змішуючись з мережною водою, регулярно підпитує утвореною чистою водою мережну воду. Так, працюючий в системі опалення об'ємом 5 м<sup>3</sup> води теплогенератор КАОМ-1,0 (потужністю 1 МВт) на протязі біля трьох діб підмішує 5т конденсату (розрахунок виконаний з припущенням, що конденсується половина утвореної в результаті спалювання палива води). Така ситуація дозволяє зробити обнадійливий прогноз по відношенню до якості мережної води у зв'язку з контактом з продуктами згорання палива і потенційній можливості утворення слабих азотних кислот. Основні технічні характеристики теплогенераторів серії КАОМ наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики теплогенераторів серії КАОМ

Назва показника	КАОМ-0,5	КАОМ-1,0	КАОМ-2,5
1. Теплова потужність, МВт (Гкал/год)	0,5 (0,43)	1,0 (0,86)	2,5 (2,15)
2. ККД, % (розрахунок по Q <sub>нр</sub> )	106 (при температурі зворотньої води – 40 °С)		
3. Робочий тиск природного газу	Низьке (< 5кПа) або середнє (10-30 кПа)		
4. Температура нагріву води, максимальна, °С	90		
5. Рівень автоматизації	Автоматичний запуск і підтримка заданого теплового режиму при будь яких температурах зовнішньої середовища		
6. Маса, кг	1600	2200	4000
7. Габаритні розміри (ширина, глибина, висота)	1,6 x 0,9 x 2,0	2,0 x 1,0 x 2,0	3,0 x 1,6 x 2,5

Основні технічні особливості теплогенератора КАОМ:

- низька металоємність (2кг/кВт);
- висока економічність (ККД до 106% у розрахунку на нищу теплоту згоряння);
- простота конструкції й експлуатації;
- компактність, легкість монтажу й обслуговування;
- повний обсяг автоматизації.

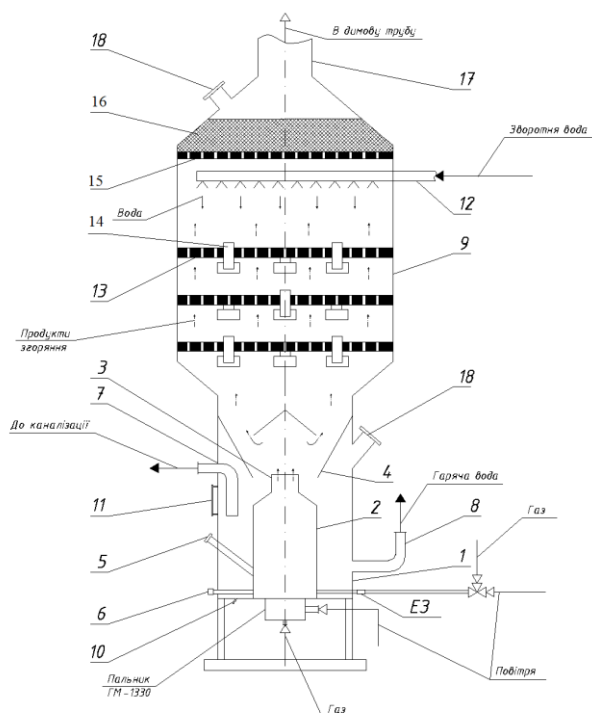
Водонагрівачі КАОМ можуть також використовуватися для групового опалення в системах, обладнаних бойлерними, в тих випадках, коли в систему необхідно подавати воду під тиском при температурі понад 100 °С.

Модуль водогрійний контактний МВК-1,0 (розробка Інституту Газу НАН України) зображений на рис. 2.6 [3].

Контактний водонагрівальний модуль містить циліндричний корпус 1 і приєднані до нього димовідвідний патрубок 17, зливний патрубок і днище. Всередині корпусу співвісно з ним розміщена циліндрична топкова камера 2, приєднана нижньою частиною своєї бокової поверхні до днища. Ззовні до днища приєднано паливоспалювальний пристрій. До верхньої частини бокової поверхні топкової камери 2 приєднано вихідний патрубок топки 3.

Обичайка утворює кільцевий канал, розташований між цією обичайкою і камерою згорання.

Над камерою згорання розміщена приєднана більшою основою до корпусу 1 скеровуюча воронка 4. Остання являє собою порожнистий зрізаний конус, розміщений меншою основою донизу. Поверхню воронки перфоровано отворами. До внутрішньої сторони поверхні воронки приєднано штирями надтопковий диск. Над надтопковим диском у корпусі розміщено контактну камеру 9. Остання містить напівпровальні пінні пластини 13 з переливними стаканами 14 для проходження води та отворами для проходження продуктів згорання. Над контактною камерою розташована підтримувальна решітка 15 з отворами і насипаним на неї шаром сталеві стружки. Між контактною насадкою та шаром сталеві стружки і розміщено приєднаний до корпусу водорозподільник 12, з'єднаний з джерелом мережевої води.



1- циліндричний корпус; 2- внутрішній циліндр; 3- патрубок; 4- обтічник; 5- вічко; 6- фотодатчик контролю за полум'ям; 7- патрубок гідрозатвору; 8- патрубок відведення гарячої води; 9- насадочна колона; 10- дренажний патрубок; 11- показник рівня води; 12- трубопровід зворотної води; 13- напівпровальна решітка; 14- переливний стакан; 15- решітка; 16- шар сталеві стружки; 17- патрубок димові труби; 18- вибуховий клапан

Рисунок 2.6 – Модуль водогрійний контактний МВК-1,0 (розробка Інституту Газу НАН України)

Контактний водонагрівальний модуль працює таким чином. Паливо у суміші з повітрям подають крізь паливоспалювальний пристрій до топкової камери 2, де воно спалюється із утворенням високотемпературних продуктів згорання. Відтак продукти згорання рухаються

догори, а їм назустріч рухається вода, що потрапляє до корпусу крізь водорозподільник 12. Отже, продукти згоряння, що утворилися у камері згорання, рухаються догори цією камерою й виходять з неї крізь вихідний патрубок топки 3. Після цього продукти згоряння, рухаючись догори, вдаряються об внутрішню поверхню обтічника 4, розвертаються і знову рухаються догори.

Потім продукти згоряння проходять крізь отвори напівпровальних пінних пластини 13 і барботують крізь рухливий шар води, що знаходиться на пластині.

Відтак продукти згоряння крізь отвори підтримувальної решітки 15 потрапляють до контактної камери 16, що складається із сталеві стружки. У контактній камері продукти згоряння просуваються догори між теплообмінними елементами насадки і виходять з контактної камери. Відтак продукти згоряння виходять з корпусу крізь димовідвідний патрубок 17. Тим часом вода, що потрапила до корпусу крізь водорозподільник 12, рухається зверху донизу назустріч продуктам згоряння і опиняється на поверхні напівпровальної пінної пластини 13. Незначна частина води провалюється крізь отвори, крізь які піднімаються продукти згоряння, а більша частина води деякий час залишається на поверхні пластини, обмінюючись теплом з барботуючими крізь її шар продуктами згорання. Якщо рівень води на поверхні пластини 13 перевищує рівень переливних стаканів 14, вода пере-ливається крізь ці стакани. Після того, як вода проходить крізь отвори напівпровальних решіток і переливні стакани, вона потрапляє на внутрішню поверхню скеровуючої воронки. Надалі вода частково проходить крізь отвори у поверхні воронки, а здебільшого перетікає до кільцевого зазору між меншим отвором воронки і зовнішньою поверхнею вихідного патрубка топки. Вода, проходячи крізь кільцевий зазор, обтікає ззовні вихідний патрубок топки 2 і нагрівається. Надалі вода просувається вздовж розжареної поверхні камери згорання, охолоджуючи. Потім, проходячи крізь перетічний канал та кільцевий зазор, вода виходить з корпусу крізь зливний патрубок.

Розміщення напівпровальних пінних пластин дає змогу організувати інтенсивний контактний теплообмін між відхідними продуктами згоряння і водою у пінному шарі і за рахунок цього глибоко утилізувати теплоту продуктів згоряння. Останні після контактної камери вже віддали воді більшу частку тепла, і через це мають відносно низьку температуру. За рахунок ефективного контактного теплообміну в пінному шарі води на напівпровальних решітках, додатково на-грівається вода та використовується прихована теплота пароутворення - відбувається конденсація водяної пари з продуктів згоряння. До того ж пінна пластина створює додатковий опір рухові води, а це сприяє підвищенню рівномірності розтікання води по перерізу теплообмінної насадки. Підвищення ступеню рівномірності розтікання води дає змогу збільшити змочуваність окремих елементів насадки, запобігти локальним перегріванням елементів, а отже, дає змогу підвищити ефективність і надійність

роботи пристрою. Запропоноване конструктивне оформлення надтопкового вузла розв'язано як звичайну задачу надтопкового диску (запобігання потраплянню води до камери згорання), так і задачу підвищення теплової ефективності пристрою й надійності його роботи, бо внаслідок організації обмивання водою вихідного патрубку топки забезпечується його охолодження з одночасним додатковим нагріванням води.

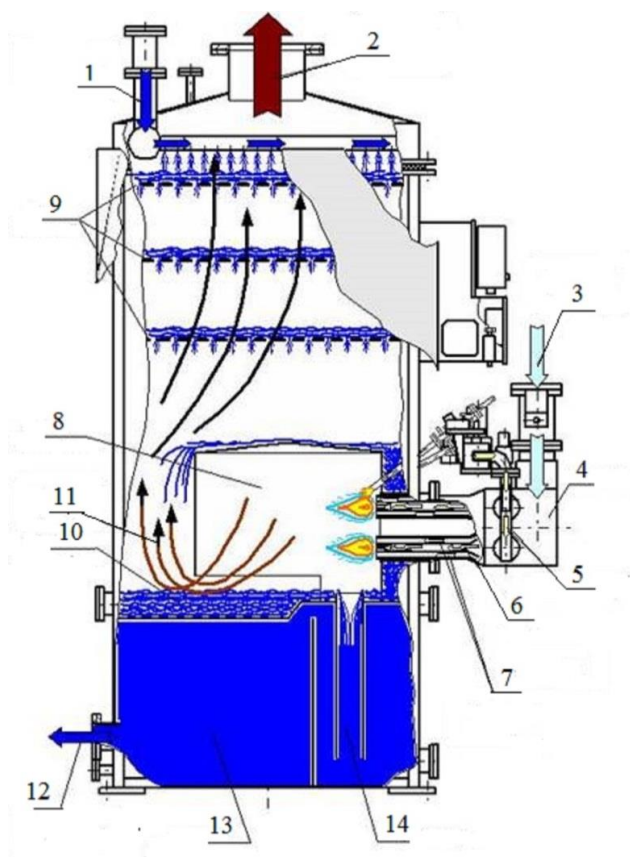
Контактний водонагрівач (рис.2.7) типу КВН був розроблений співробітниками НВП «Лота».

Контактний водонагрівач КВН призначений для роботи в автономних мережах в якості теплогенеруючого пристрою. КВН представляє собою теплообмінний апарат проточного типу, нагрів води в якому здійснюється за допомогою безпосереднього її контакту з продуктами згорання. За рахунок високої ефективності контактного теплообміну в апараті з малими габаритами вдається забезпечити якісне охолодження продуктів згорання і їх низьку температуру на виході з теплогенератора. При цьому досягається високе значення коефіцієнту використання теплової енергії спаленого палива. В контактних установках легко можна добитися, щоб температура відхідних газів була нижчою за температуру «точки роси». При цьому відбувається часткова конденсація водяних парів у продуктах згорання і виділяється значна кількість тепла. Це використання «прихованої теплоти» підвищує ККД установки вище 100% відсотків у перерахунку на нижчу теплоту згорання, а також сконденсована волога залишається в контурі і компенсує протічки в тепловій мережі.

Досвід експлуатації теплогенератора показав, що з використанням інгібітору швидкість корозії не перевищує 0,03 - 0,05 мм/рік. Витрати інгібітору складають 50-400 кг за опалювальний період (в залежності від об'єму системи опалення, наявності протікань, ступеня зношеності труб і т.д.). Відсутність теплообмінних поверхонь дозволяє повністю відмовитися від хімводоочистки, що значно спрощує і здешевлює експлуатацію контактних установок [4].

Низька концентрація шкідливих викидів у продуктах згорання і мала питома витрата палива на КВН дозволяє суттєво покращити екологічні показники роботи котелень у порівнянні з котлами традиційної конструкції. КВН характеризується широким діапазоном регулювання потужності без зміни ККД, що дозволяє погоджувати потужність, що виробляється з реальними показниками теплового споживання, що забезпечує додаткову економію палива.





1- зворотна мережева вода; 2- вихід продуктів згорання; 3- повітря від вентилятора; 4- пальник; 5- природний газ; 6- газоповітряна суміш; 7- вторинне повітря; 8- камера згорання; 9- блок решіток; 10- контактна ємність; 11-продукти згорання; 12- нагріта мережева вода; 13- накопичувальний бак; 14- гідро засув;

Рисунок 2.7 – Контактний водонагрівач КВН (розробка НВП «Лота»)

## 2.2 Теплова схема теплозабезпечення

У відповідності до теплових навантажень на опалення ТРЦ, які складають 1850 кВт було виконано підбір та розрахунок двох контактних теплогенераторів потужністю 1000,0 кВт, кожен. Приміщенні котельні знаходиться на покрівлі ТРЦ. Теплову схему системи опалення показано на рис. 2.8.

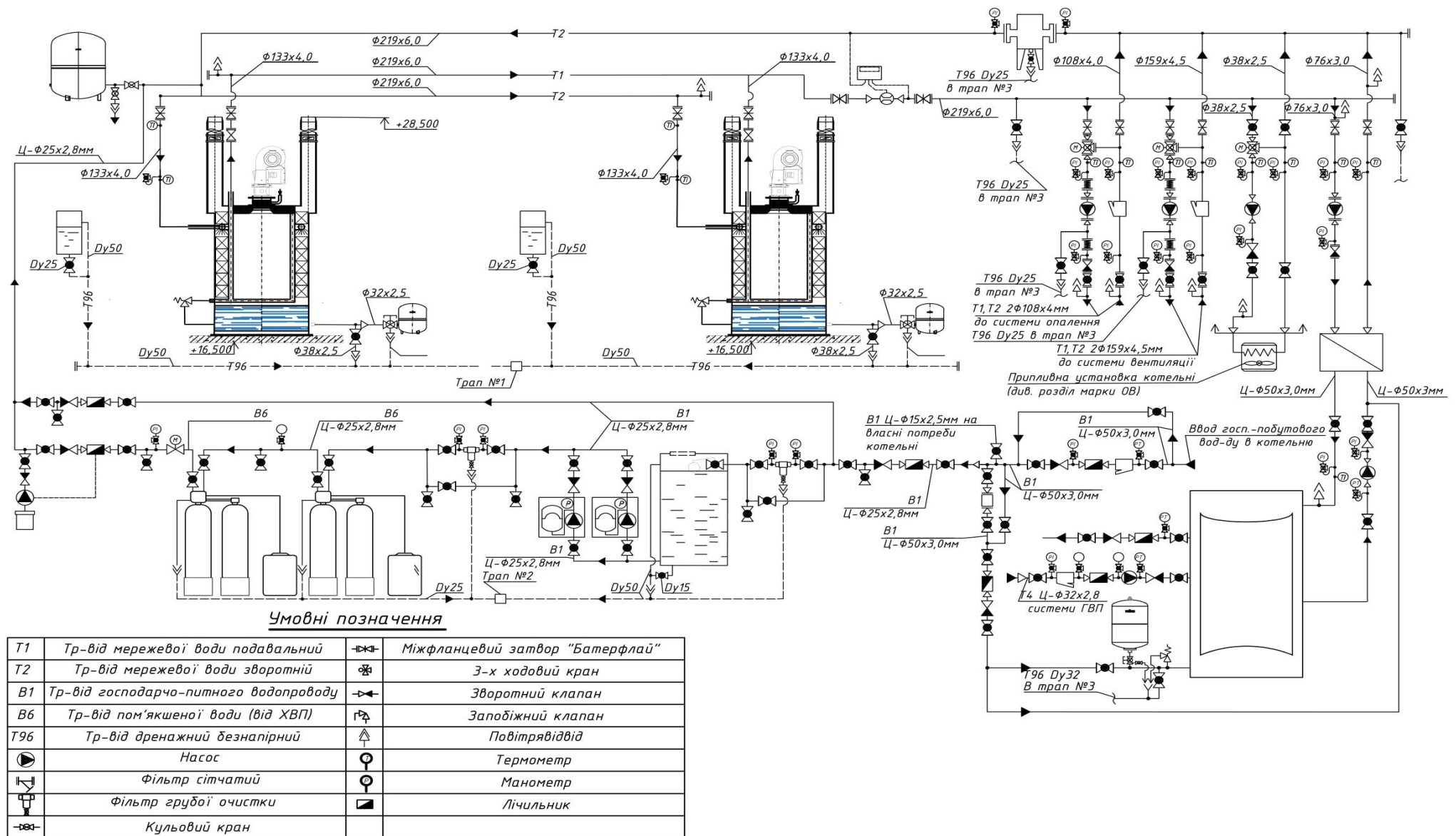


Рисунок 2.8 - Схема теплозабезпечення на базі контактного водневого теплогенератора

### **3 ЗАГАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІ ТИПУ «ТВАК»**

#### **3.1 Конструктивні особливості ТВАК**

Проаналізувавши всі переваги та недоліки контактних теплогенераторів було розроблено модель контактного теплогенератора нового покоління типу ТВАК яка показана на рис. 3.1. Даний теплогенератор має можливість працювати на водневому паливі. Принцип роботи ТВАК має наступний алгоритм:

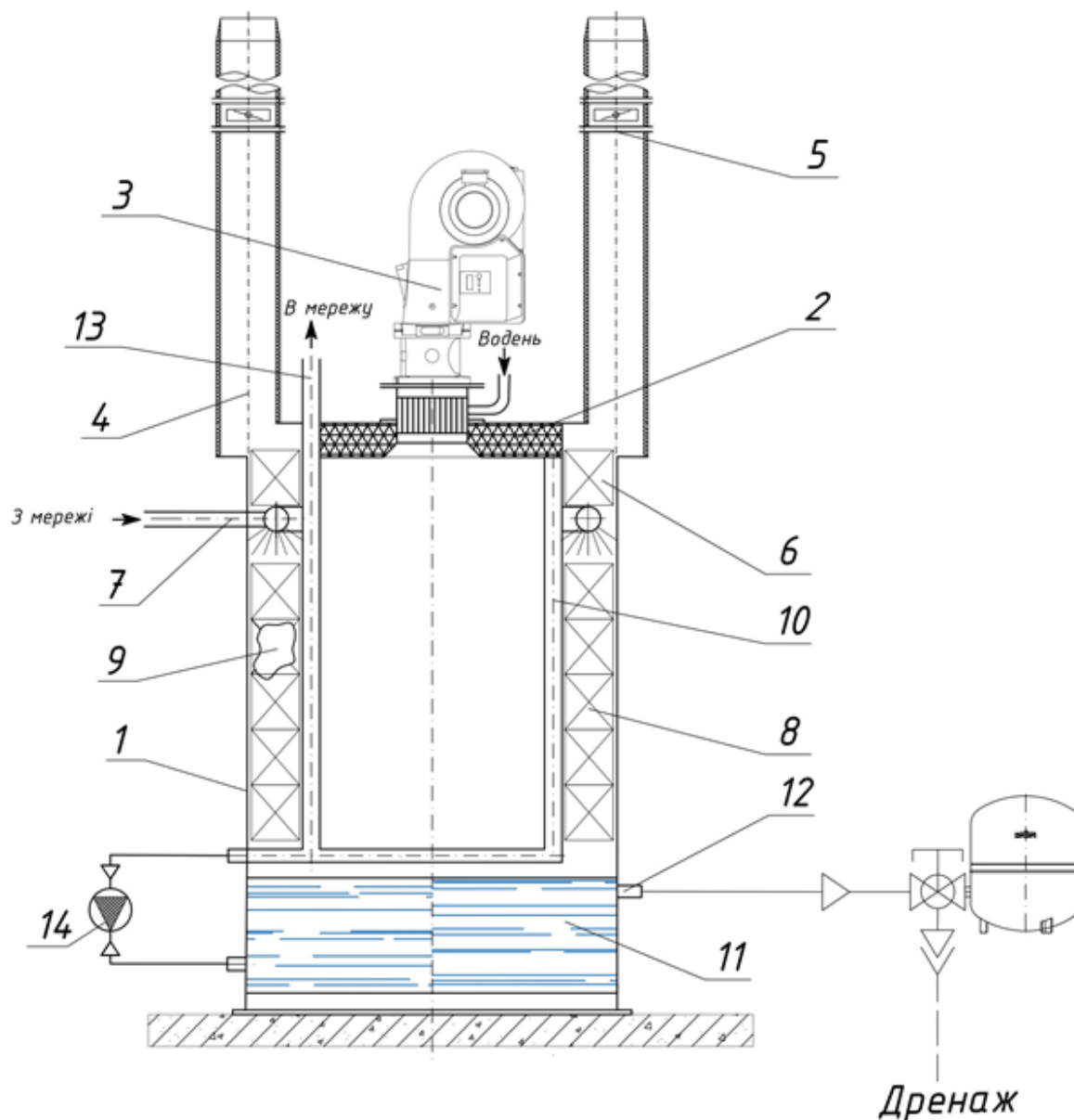
Від джерела генерування водневого палива у пальник надходить екологічно чистий водень. За допомогою мікрофакельного пальника 3 в топковій камері відбувається процес спалювання водневого палива. При спалюванні частина теплового потоку надходить на вертикальний теплообмінник 10. Друга частина теплового потоку виділяється за допомогою конвективного та променевого теплообміну. Відбиваються від горизонтальної поверхні води у проміжному баку 11 продукти згоряння попадають у кільцевий контактний теплообмінник 9.

За допомогою циркулюючого насосу воду подають через колектор подачі мережевої води 7 на зрошування контактної насадки 8. Далі вода розтікаючись плівкою по перфорованих гофрованих металевих листах і плівкою стікаючи з листа на лист одержує тепло від продуктів згоряння водню, що вже віддали частину теплоти у вертикальному теплообміннику 10. Після процесу стікання по перфорованих листах вода потрапляє в проміжний бак 11. Далі вологі продукти згоряння направляються. При проходженні вологих продуктів згоряння через краплевідділювач 6 виділяється волога яка викидаються в атмосферу через вихлопний патрубок 4.

Вода яка накопичується в проміжному баку за допомогою циркуляційного насосу 14 подають у вертикальний трубчастий проточний теплообмінник 10. Після чого через вихідний патрубок 13 надходять на подавальний трубопровід у мережу.

Водяна пара в продуктах згоряння органічних палив під час контакту з водою, температура якої менше за 50°C, ефективно конденсується і входить до складу циркулюючої води в проміжному баку. За допомогою переливного патрубка 12 її надлишок з проміжного баку можна використовувати на довільні господарські потреби.

Дана модель контактного теплогенератора являє собою агрегат, що працюють під невеликим тиском. Тому ТВАК не потребує індивідуального приміщення для його встановлення. Установка може бути встановлена в існуючих технічних приміщеннях.



1 – корпус; 2 – кришка; 3 – водневий пальник; 4 – вихлопний патрубков; 5 – вибуховий клапан; 6 – краплевідділювач; 7 – кільцевий колектор подачі мережевої води; 8 – контактна насадка; 9 – циліндричний кільцевий контактний теплообмінник; 10 – вертикальний трубчатий проточний теплообмінник; 11 – проміжний бак; 12 – переливним патрубком; 13 – вихідний патрубков; 14 – циркуляційний насос.

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд водневого теплогенератора ТВАК

Особливості контактного теплогенератора, що працює на водневому паливі:

- Дана модель теплогенератора являє собою установку з високою тепловою ефективністю (ККД досягає 106% в перерахунку на нижчу теплоту згоряння  $Q_H^P$ );

- ТВАК має низьке співвідношення одиниці маси на одиницю отриманої теплової потужності(до 2 кг/кВт);
- За наявності циркуляційного контуру установка має незначний внутрішній обсяг води;
- Установка має змогу підключення контуру автоматизації з підтриманням сталого теплового режиму;
- Процес конденсації водяної пара в продуктах згоряння дає нам додатково технічно чисту воду.

Для спалювання водневого палива було обрано мікрофакельний пальник дифузійного типу [5] МПДТ- Н<sub>2</sub> (Рис.3.2). Даний пальник має наступні переваги:

- Пальник типу МПДТ- Н<sub>2</sub> має можливість роботи при низькому тиску;
- Конструкція пальника забезпечує низький аеродинамічний опір (менше 100 Па);
- при роздільній подачі газу і повітря пальник має змогу підігрівати повітря, що забезпечує отримання високих температур в топці;
- при не стійкому коефіцієнту надлишку повітря пальник має розширений діапазон стійкої роботи, що супроводжується високою експлуатаційною надійністю;
- Даний дифузійний пальник має низький рівень емісії  $NO_x < 20$  ppm.

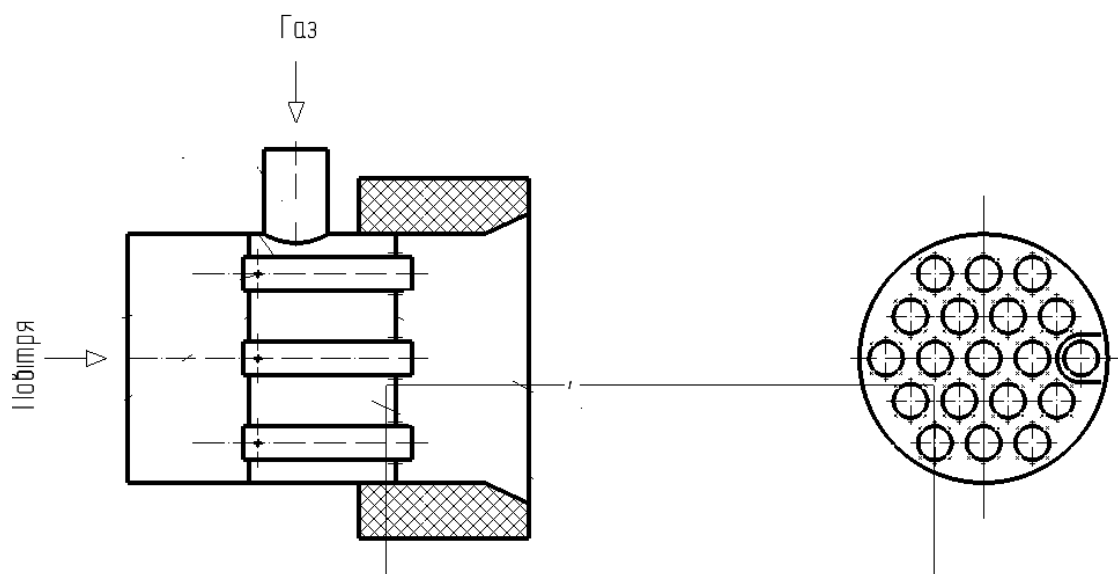


Рисунок 3.2 - Принципова конструктивна схема мікрофакельного пальника для спалювання водню МПДТ-Н<sub>2</sub>

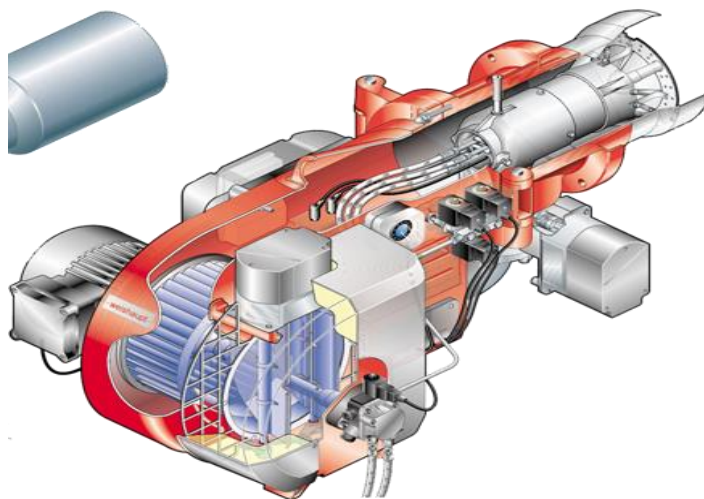


Рисунок 3.3 - Загальний вид мікрофакельного пальника для спалювання водню МПДТ-Н<sub>2</sub>

### 3.2 Загальні особливості та характеристики спалювання водню у ТВАК

В цілому, використання теплогенераторів контактного типу (ТВАК) для цілей теплопостачання при районному, промисловому і індивідуальному теплопостачанні являється перспективним. Це пов'язано з наявністю комплексу позитивних особливостей і характеристик контактних теплогенераторів, основними з яких є підвищення ККД на 10...12% [6] і зменшення витрат палива.

ТКТ мають низьку теплову інерцію, що характеризує їх як апарати з властивістю швидкого запуску і швидкого зупину. Так, наприклад, ТВАК після пуску через 10-15 хв після увімкнення пальників дозволяє подавати споживачеві воду з температурою 95 ° С, що важливо в режимі пікових навантажень в системах гарячого водоснаб- вання і опалення будівель або технологічних цілей. Подача води в ТВАК після відключення пальників може бути припинена через 12-15 хв. Це властивість дозволяє їх швидко зупинити при різкому зниженні теплового завантаження споживачем.

Крім того, ТВАК не вимагає допоміжного теплового обладнання такого, яке обов'язково має бути для котлів: бойлерів, насосів для підживлення, установок для хімводоочищення.

Також, використання контактних апаратів, які мають низьку металоємність (менше 2 кг ваги на кВт виробленої теплоти), дозволить зменшити загальні витрати на будівництво котельні (разом зі збірним баком) в середньому в 1,4 рази в порівнянні із загальною вартістю котельні тієї ж потужності.

Загальна вартість 1Гкал теплоти, отриманого від контактних апаратів експлуатаційні витрати і на паливо, електроенергію, персонал, амортизацію і поточний ремонт обладнання в 4,3 рази менше, ніж для варіантів котелень.

Таким чином, проведені дослідження дозволили на підставі комплексного аналізу існуючих конструкцій теплогенераторів виявити їх обмеження і недоліки з точки зору вирішення поставлених завдань.

Використання агрегатів нового покоління типу ТВАК дозволить перейти до детального опрацювання нової енергетичної парадигми (НЕП) тепlopостачання локальних і районних зон житлових і промислових районів міст. ТВАК дозволить використовувати можливості накопчування електричної енергії водневими генераторами в періоди «провалу» електроспоживання і накопченого водню в період «пікових» теплоспоживання.

### **3.3 Розрахунок основних параметрів мікрофакельного пальника дифузійного типу**

Завдяки конструкції та способі підводу повітря та газу у пальнику трубчастого типу можливо зменшення товщини обмазки екранних труб котлоагрегату зі сторони амбразури пальникового пристрою та збільшення діаметру амбразури. Тому для подальших розрахунків приймаємо значення діаметру амбразури пальникового пристрою 250 мм.

Використаємо пальник з трубками по повітрю у співвідношенні внутрішнього діаметру трубки до зовнішнього становить

$$d_{\text{пов}} / D_{\text{пов}} = 16/18 \text{ мм.} \quad (3.1)$$

Кількість цілих трубок по повітрю складає

$$N_{\text{пов}} = 55 \text{ шт.} \quad (3.2)$$

Кількість цілих отворів по водню  $H_2$  складає

$$n_{\text{отв}} = 106 \text{ шт.} \quad (3.3)$$

Діаметр отворів, мм, по водню  $H_2$

$$d_{H_2} = 5 \text{ мм.} \quad (3.4)$$



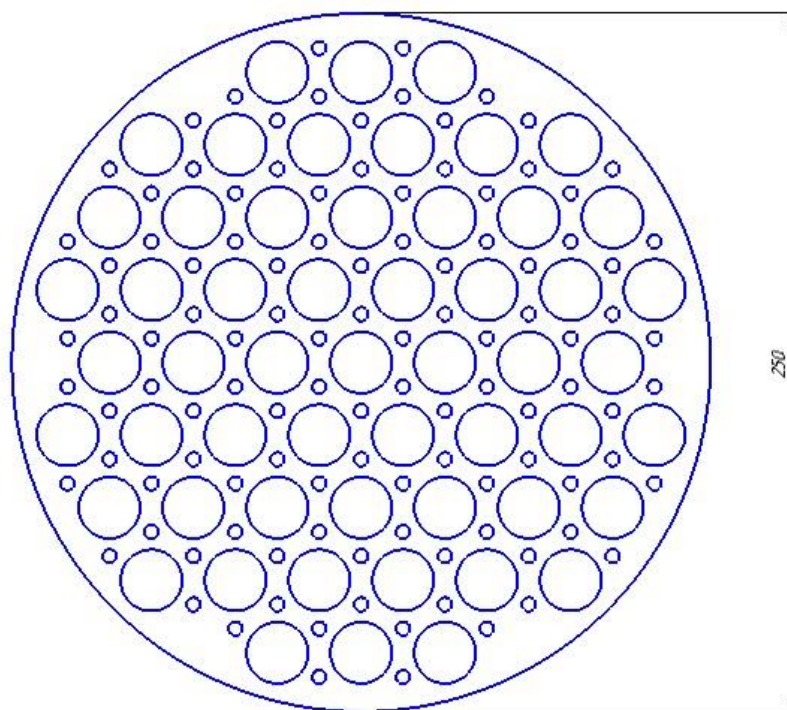


Рисунок 3.4 - Компонівка труб пальника

Площа поперечного перерізу однієї трубки,  $\text{м}^2$ , по повітрю

$$f_{\text{нов}}^{\text{mp}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{нов}}^{\text{mp}})^2}{4} \quad (3.5)$$

$$f_{\text{нов}}^{\text{mp}} = \frac{3,14 \cdot 0,016^2}{4} = 0,254 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Загальна площа поперечного перерізу,  $\text{м}^2$ , по повітрю

$$f_{\text{нов}}^{\text{mp}} = f_{\text{нов}}^{\text{mp}} \cdot N_{\text{нов}}^{\text{заг}} \quad (3.6)$$

$$f_{\text{нов}}^{\text{mp}} = 0,254 \cdot 10^{-3} \cdot 106 = 2,696 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

Площа поперечного перерізу одного отвору,  $\text{м}^2$ , по водню  $\text{H}_2$

$$f_{\text{H}_2}^{\text{mp}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{e}}^{\text{mp}})^2}{4} \quad (3.7)$$

$$f_{\text{H}_2}^{\text{mp}} = \frac{3,14 \cdot 0,005^2}{4} = 1,96 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Загальна площа поперечного перерізу,  $\text{м}^2$ , по водню  $\text{H}_2$ :

$$f_{\text{H}_2} = f_{\text{H}_2}^{\text{омв}} \cdot N_{\text{e}} \quad (3.8)$$

$$f_{\text{H}_2} = 1,96 \cdot 10^{-5} \cdot 106 = 207,76 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Швидкість водню,  $\text{м/с}$ , знаходимо за формулою

$$W_{\text{H}_2}^{\text{mp}} = \frac{V_{\text{e}}^{\text{mp}}}{f_{\text{e}}^{\text{mp}}} \quad (3.9)$$



$$W_{H_2}^{mp} = \frac{0,0097}{207,76 \cdot 10^{-5}} = 4,7 \text{ м/с}$$

Витрату повітря, м<sup>3</sup>/с, знайдемо за формулою

$$V_s^{mp} = \alpha^{mp} \cdot V_{нов}^{стex} \cdot V_{H_2}^{mp} \quad (3.10)$$

Приймаємо для пальника мікрофакельного типу  $\alpha^{mp} = 1,05$ , тоді

$$V_{H_2}^{mp} = 1,05 \cdot 3,455 \cdot 0,0097 = 0,0352 \text{ м}^3/\text{с}$$

Швидкість повітря, м/с, визначаємо

$$W_{нов}^{mp} = \frac{V_{нов}^{mp}}{f_{нов}^{mp}} \quad (3.11)$$

$$W_{нов}^{mp} = \frac{0,0352}{2,696 \cdot 10^{-3}} = 13,06 \text{ м/с}$$

### 3.4 Моделювання теплових та аеродинамічних процесів

В програмному середовищі SOLIDWORKS було виконано модель даного теплогенератора. На базі контактного теплогенератора ТВАК було виконано моделювання аеродинамічних та теплових процесів. На рис. 3.5 зображена 3D модель камери згоряння на базі вертикального трубчатого теплообмінника.

Моделювання процесу горіння в топковій камері було виконано згідно із вихідними розрахунковими даними теплогенератора ТВАК. Основні параметри, які потрібно досліджувати: розподіл температурного поля, тепловий потік який передається променевим теплообміном до внутрішніх стінок вертикального трубчатого теплообмінника, конвективний тепловий потік, що надходить на перфоровану контактну насадку разом із продуктами згоряння, температура та швидкість води на подавальному трубопроводі; температура і швидкість продуктів згоряння на виході із теплогенератора.

За допомогою платформи 3D моделювання Solidworks максимально точно було змодельовано розподіл температурного поля та швидкість димових газів, які показано на рис.3.6 та рис.3.7 відповідно.

Розрахункові дані для моделювання:

- Розрахункова температура факелу: 1700°C
- Номінальна теплова потужність: 1 МВт;
- Кількість отворів у пальнику по водню: 106 отв.  $d = 5 \text{ мм}$ ;
- Загальна кількість отворів у пальнику по повітрю: 55 отв.  $d = 16 \text{ мм}$ ;
- Масова витрата води: 8,16 кг/с;

- Температура газу на вході: 20°C;
- Розрахункова швидкість газу на вході: 4,7 м/с;
- Температура повітря на вході: 20°C;
- Швидкість повітря на вході: 13,06 м/с;
- Діаметр патрубку підведення води:  $d = 32$  мм;
- Температура зворотної води на вході з мережі: 60°C;
- Температура подавальної води на вході в мережу : 90°C;

На рисунку 3.4 зображено компоновку пальника мікрофакельного типу розрахованого для контактного теплогенератора ТВАК. Пальник має 55 отв. діаметром 16 мм по повітрю і 106 отв. діаметром 5 мм по водню. Загальник діаметр пальника 250 мм.

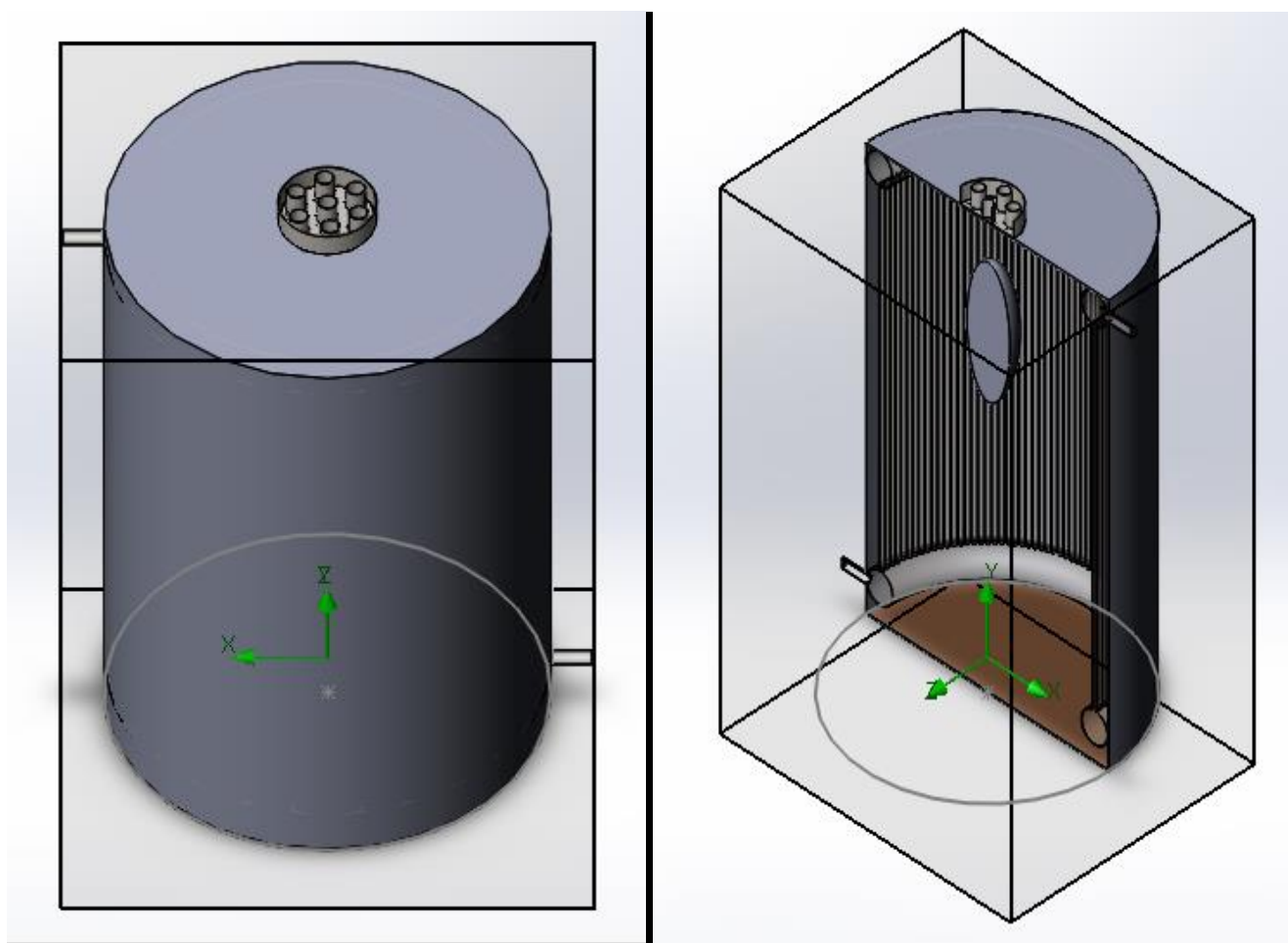


Рисунок 3.5 – Камера згоряння контактного теплогенератора

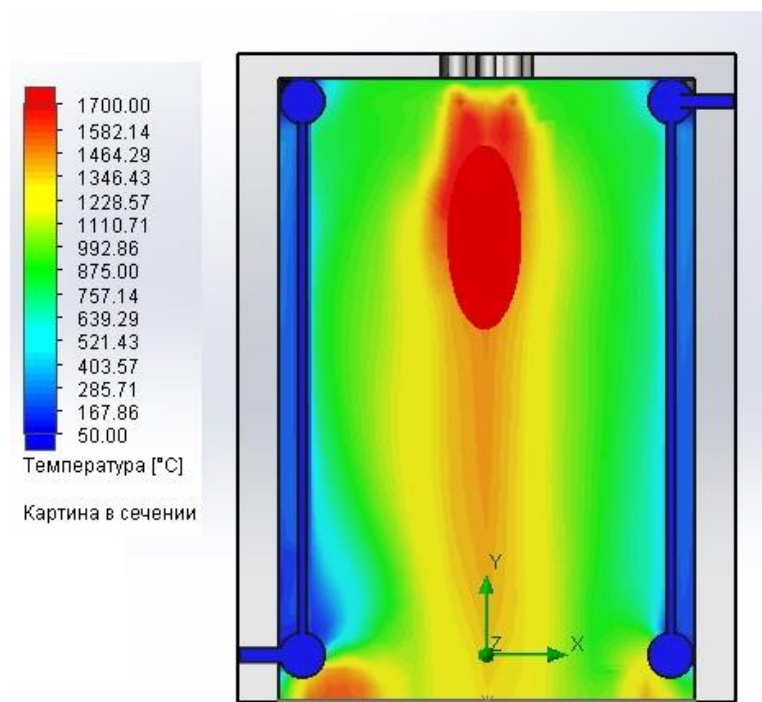


Рисунок 3.6 – Температурні поля у камері згоряння ТВАК

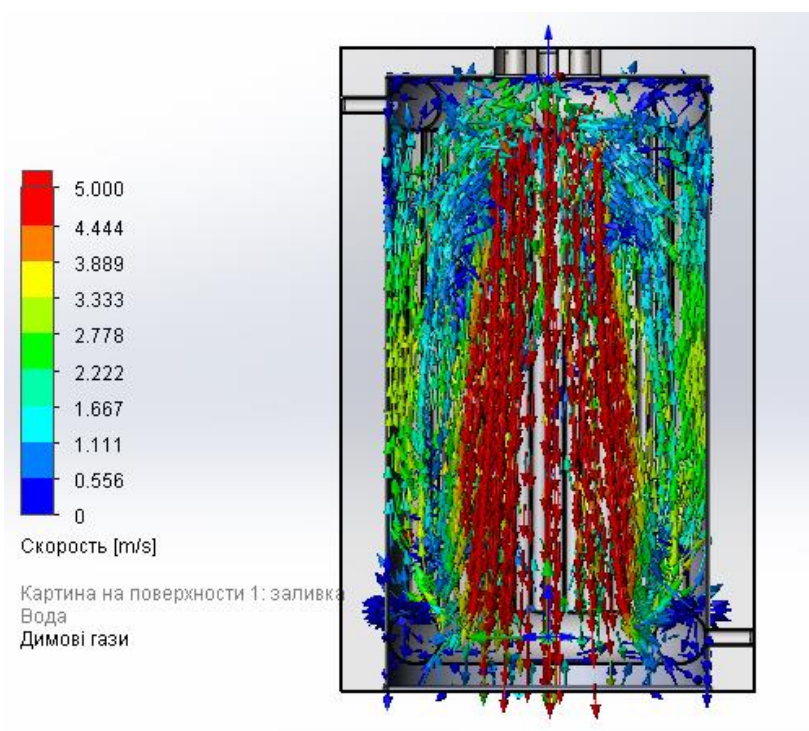


Рисунок 3.7 – Модельні дані з швидкості димових газів

На рис. 3.8 показано розподіл температури димових газів та води у топці.

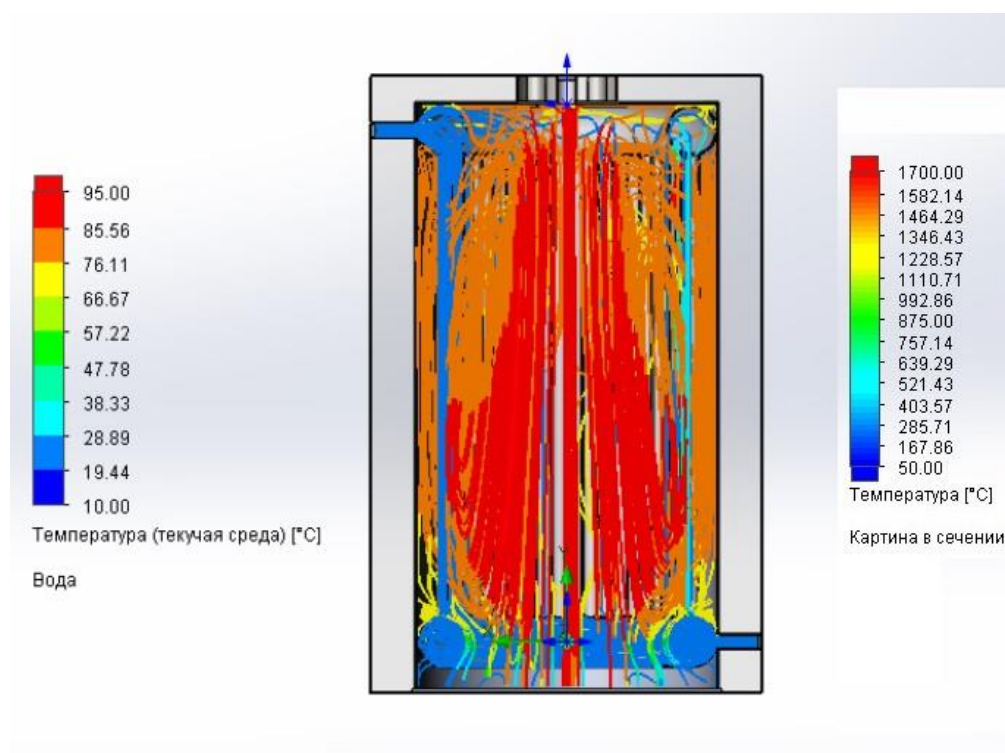


Рисунок 3.8 – Модельні дані з температури димових газів та води у топці

### 3.5 Теплотехнічний розрахунок ТВАК

Розрахунок променевого теплообміну між сірим газом і його замкнутою сірою оболочкою, кВт, виконують за формулою Нуссельта

$$Q_w = \varepsilon_{np} \cdot \sigma_o \cdot (T_z^4 - T_w^4) \cdot F_w \quad (3.12)$$

де  $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – стала Стефана–Больцмана;

$Q_w$  - результуючий тепловий потік випромінюванням, що сприймається оболонкою, Вт;

$T_z$  і  $T_w$  - температури газу і оболочки, К;

$F_w$  - площа поверхні оболочки, м<sup>2</sup>;

$\varepsilon_{np}$  - приведена ступінь чорноти.

Приведена ступінь чорноти в системі газ-оболочка розраховуються за формулою

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \quad (3.13)$$

де  $\varepsilon_z$  и  $\varepsilon_w$  – степінь чорноти газу і оболочки відповідно.

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O}^* + \varepsilon_{SO_2} \quad (3.14)$$

### 3.5.1 Площа поверхні оболочки, м<sup>2</sup>

$$F_w = \pi \cdot \frac{d}{2} \cdot h \cdot n \quad (3.15)$$

де  $h=1600$  мм – висота трубки топкового екрану, м;

$d=48$  мм. – зовнішній діаметр трубки топкового екрану, м;

$n=53$  – кількість трубок топкового екрану, шт.;

$$F_w = 3,14 \cdot \frac{0,048}{2} \cdot 1,6 \cdot 53 = 6,39 \text{ м}^2$$

### 3.5.2 Розрахунок степеня чорноти димових газів

Визначаємо ефективну довжину факелу, м, всередині топки ТВАК

$$l_\phi = 3,6 \cdot \frac{V_r}{F_w} \quad (3.16)$$

де  $V_r$  – об'єм, який займає газ, м<sup>3</sup>;

$$l_\phi = 3,6 \cdot \frac{0,727}{6,39} = 0,41 \text{ м}$$

Розраховуємо парціальні тиски двоокису вуглецю і водяної пари

$$p_{CO_2} = p_\kappa \cdot r_{CO_2} \quad (3.17)$$

$$p_{H_2O} = p_\kappa \cdot r_{H_2O} \quad (3.18)$$

де  $p_\kappa$  - тиск димових газів в теплогенераторі, МПа;

$r_{CO_2}, r_{H_2O}$  - відповідно об'ємна доля двоокису вуглецю та водяної пари в факелі.

$$p_{CO_2} = 0,107 \cdot 0 = 0$$

$$p_{H_2O} = 0,107 \cdot 0,29 = 0,031 \text{ МПа}$$

Визначаємо добуток парціального тиску на ефективну довжину факелу, атм см, відповідно для двоокису вуглецю та водяної пари

$$l_\phi \cdot p_{CO_2} = 0 \quad (3.19)$$

$$l_{\phi} \cdot p_{H_2O} = 0,41 \cdot 0,031 = 12,7 \text{ атм. см} \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_{CO_2} = 0$$

За номограмою визначаємо ступінь чорноти діоксиду вуглецю  $\varepsilon_{H_2O}$  (див. рис. 3.9) в топковій камері ( $t=1700^\circ\text{C}$ ).

За номограмою визначаємо поправку  $\beta$ , що враховує парціальний тиск водяної пари  $P_{H_2O}$  при визначенні ступеня чорноти (див. рис. 3.10).

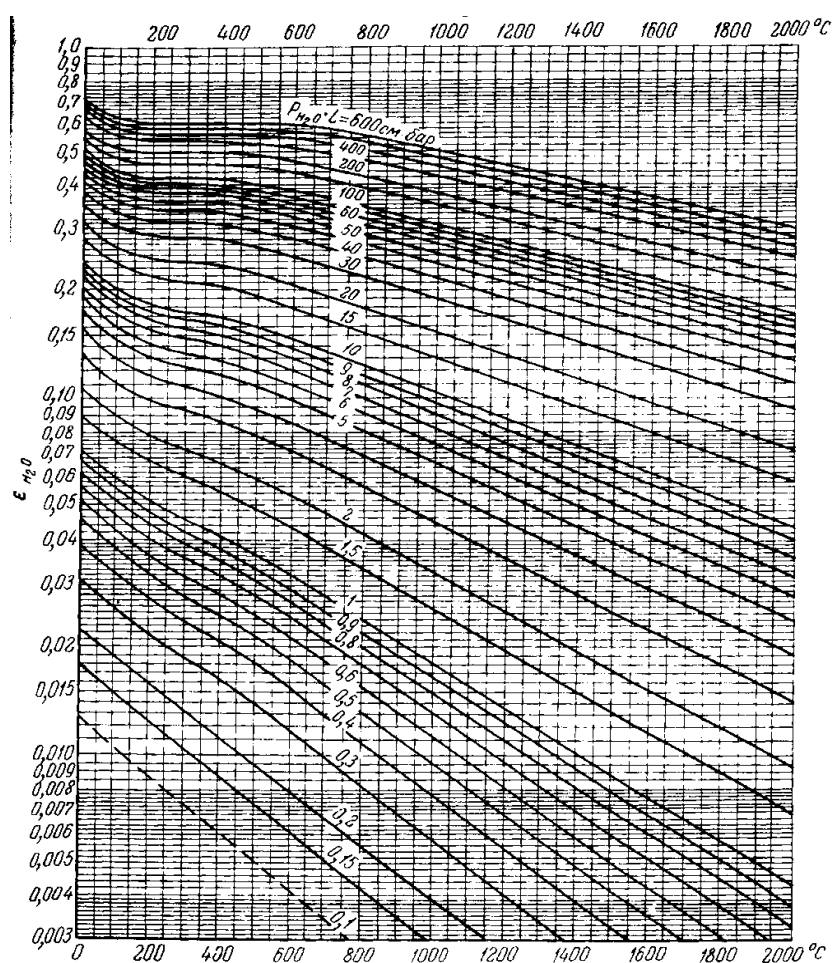


Рисунок 3.9 - Залежність ступеня чорноти водяної пари  $\varepsilon_{H_2O}$  від добутку  $P_{H_2O} \cdot l$  і температури у топковій камері ( $t=1700^\circ\text{C}$ ).

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,075$$

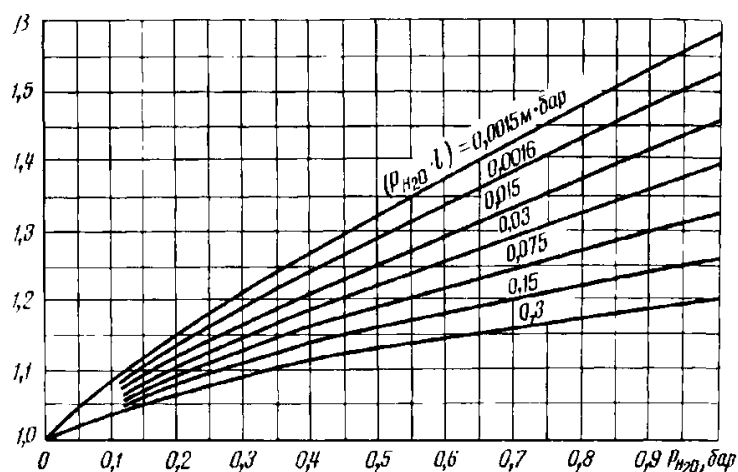


Рисунок 3.10 - Поправка  $\beta$ , що враховує парціальний тиск водяної пари  $P_{H_2O}$  при визначенні ступеня чорноти газу у топковій камері ( $t=1700^\circ\text{C}$ )

$$\beta = 1,16$$

Степінь чорноти газу

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_{\Gamma} = 0 + 1,16 \cdot 0,075 = 0,087$$

### 3.5.3 Степінь чорноти оболочки

Степінь чорноти оболочки визначаємо в залежності від матеріалу, оберемо – сталь листовая шлифованная з  $\varepsilon_w = 0,6$ .

Приведена ступінь чорноти в системі газ-оболочка

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\Gamma}} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \quad (3.22)$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{0,087} + \frac{1}{0,6} - 1} = 0,0822$$

3.5.4 Кількість теплоти, кВт, яка виділяється при променевому теплообміні визначаємо за формулою (3.12)

$$Q_{np} = 0,0822 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(1973)^4 - (348)^4] \cdot 6,39 = 451 \text{ кВт}$$

### 3.5.5 Конвективний теплообмін

Розрахунок конвективного теплообміну, кВт, виконують за формулою

$$Q_k = \alpha_{\kappa\phi} \cdot F_k \cdot (t_{\phi} - \bar{t}_{CT}) \quad (3.23)$$

де  $\alpha_{\kappa\phi}$  - коефіцієнт тепловіддачі від димових газів до стінок топки, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$F_K=6,39$  м<sup>2</sup> - площа поверхні оболочку, м<sup>2</sup>;

$t_\phi=1700$  °С - температура факелу, °С;

$\bar{t}_{CT}$  – середня температура стінки, °С

Середня температура екранних труб °С

$$\bar{t}_{CT} = \frac{t_{ex} + t_{вих}}{2} \quad (3.24)$$

де  $t_{ex} = 60^\circ\text{C}$  – температура води на вході в екранні труби, °С;

$t_{вих} = 90^\circ\text{C}$  – температура води на виході в екранні труби, °С;

$$\bar{t}_{CT} = \frac{60 + 90}{2} = 75^\circ\text{C}$$

### 3.5.6 Фізичні властивості димових газів

Визначаємо фізичні властивості димових газів при температурі  $t_\phi = 1700^\circ\text{C}$ , [7].

$\lambda_{ГАЗ}$  – коефіцієнт теплопровідності газів у топковій камері при температурі

$t_{газ}=1700^\circ\text{C}$ ,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ , [7];

$$\lambda|^{1700} = 0,1687 \frac{Вт}{м \cdot К}$$

$\nu_{ГАЗ}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості газів у топковій камері при температурі

$t_{газ}=1700^\circ\text{C}$ , м<sup>2</sup>/с,

$$\nu_{ГАЗ}|^{1700} = 155 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$$

Pr- число Прандлє для димових газів при температурі  $t_{газ}=1700^\circ\text{C}$  [7].

$$Pr_{ГАЗ}|^{1700} = 0,51$$

### 3.5.7 Визначаємо режим руху димових газів в середині топкової камери

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega_{ГАЗ} \cdot D}{\nu_{ГАЗ}} \quad (3.25)$$

де  $\omega_{ГАЗ}$  – швидкість руху димових газів, що омивають внутрішню поверхню

теплогенератора, м/с;

$D = 0,8$  м.- діаметр топкової камери, м;

Приймаємо швидкість руху димових газів  $\omega_{ГАЗ} = 20$  м/с



$$Re = \frac{20 \cdot 0,8}{155 \cdot 10^{-6}} = 103225,8$$

Критерій Нусельта визначається по формулі

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_{ГАЗ}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{ГАЗ}}{Pr_{СТ}} \right)^{0,25} \quad (3.26)$$

$$Nu = 0,037 \cdot 103225,8^{0,8} \cdot 0,51^{0,43} \cdot \left( \frac{0,51}{0,7} \right)^{0,25} = 262,5$$

Коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К), визначаємо за формулою

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{ГАЗ}}{D} \quad (3.26)$$

$$\alpha = \frac{262,5 \cdot 0,1687}{0,8} = 55,35 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

3.5.8 Кількість теплоти, кВт, яка виділяється при конвективному теплообміні визначаємо за формулою (3.23)

$$Q_K = 55,35 \cdot 6,39 \cdot (1700 - 75) = 574,8 \text{ кВт}$$

3.5.9. Внутрішній баланс теплогенератора

Сумарний тепловий потік теплогенератора ТВАК, кВт

$$\sum Q = Q_{np} + Q_K \quad (3.27)$$

де  $Q_{np}$  - теплота, що виділяється при променевому теплообміні, кВт;

$Q_K$  - теплота, що виділяється при конвективному теплообміні, кВт;

$$\sum Q = 451 + 574,8 = 1025,8 \text{ кВт}$$

Масову витрату води, кг/с, визначаємо з рівняння теплового потоку [8]

$$\sum Q = m_{\tau}^{води} \cdot C_p \cdot (t_{вих} - t_{вх}) \quad (3.28)$$

$$m_{\tau}^{води} = \frac{\sum Q}{C_p \cdot (t_{вих} - t_{вх})}$$

де  $m_{\tau}^{води}$  — масова витрата води, кг/с;

$C_p = 4,191 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)}$  - теплоємність води при середній температурі теплоносія

$$m_{\tau}^{води} = \frac{1025,8}{4,191 \cdot (90 - 60)} = 8,16 \text{ кг/с}$$

Масову витрату води також можна визначити через рівняння нерозривності потоку [8]

$$m_{\tau}^{води} = \rho \cdot \omega_{вода} \cdot f_{1mp} \cdot n \quad (3.29)$$

де  $\rho = 974,8 \text{ кг/м}^3$  густина води при температурі  $\bar{t}_{CT} = 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [7].

$n = 53$  - кількість трубок топкової камери, шт.;

$\omega_{вода}$  — швидкість руху води, м/с;

$f_{1mp}$  - площа поперечного перерізу однієї трубки,  $\text{м}^2$ , визначається за формулою (3.30)

$$f_{1mp} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3.30)$$

$$f_{1mp} = \frac{\pi \cdot 0,040^2}{4} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

За допомогою рівняння (3.29) визначаємо швидкість води в екранних трубках теплогенератора, м/с

$$\omega_{вода} = \frac{m_{\tau}^{води}}{\rho \cdot f_{1mp} \cdot n}$$

$$\omega_{вода} = \frac{8,16}{974,8 \cdot 1,26 \cdot 10^{-3} \cdot 53} = 1,25 \text{ м/с}$$

## 4 ОПИС СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ВОДНЮ ДЛЯ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЦЕНТРУ

### 4.1 Загальні відомості принципу генерування водню

На Землі у звичайних природних умовах молекулярний водень майже не зустрічається. Більшість водню на Землі зв'язана з киснем у воді. Виробництво елементарного водню вимагає переробки носія водню, наприклад, викопного палива і води. Витрачаються викопні ресурси та виділяється вуглекислий газ, але найчастіше подальший вклад енергії, крім викопного палива, уже не потрібний. Розкладання води вимагає витрат електроенергії або тепла, одержаного з будь-якого первинного джерела енергії (спалення викопного палива, атомної енергії або відвлюваних джерел енергії) [9].

В промисловості водень виробляється через перетворення пари, з використанням викопних видів палива, наприклад, природного газу, нафти чи вугілля. Енергоємність виробленого водню менше, ніж енергія, що міститься у вихідному паливі, але завдяки високому ККД паливних елементів вона може бути використана повніше, ніж при безпосередньому використанні вихідного палива. Внаслідок перетворення вихідного палива, в атмосферу може викидатися вуглекислий газ, так само, як внаслідок роботи двигуна автомобіля. Але завдяки високому ККД паливних елементів його кількість може бути меншою, ніж при використанні палива безпосередньо.

Невелика частина водню (4% в 2006 році) отримується шляхом електролізу води. Для одержання кілограму водню таким шляхом необхідно витратити приблизно 50 кіловат-годин електроенергії [10].

#### 4.1.1 Біологічне виробництво

Ферментативне виробництво водню - це ферментативне перетворення органічного субстрату в біоводень, що здійснюється групою бактерій за допомогою мультиферментативних систем в три кроки, аналогічно до анаеробного перетворення.

Темнова ферментація не потребує світлової енергії, тому можливе неперервне виробництво водню з органічних сполук - вдень і вночі. Фотоферментація відрізняється від темної ферментації тим, що вона протікає лише за наявності світла. Наприклад, фотоферментація з *Rhodobacter sphaeroides* SH<sub>2</sub>C може бути використана для перетворення нижчих жирних кислот у водень. Електрогідрогенезис використовується в мікробних паливних елементах, де водень виробляється з органічних речовин (наприклад, зі стічних вод або твердих речовин) при напрузі 0,2 - 0,8 V.

Біоводень може вироблятися у біореакторі, що містить водорості. Наприкінці 1990-х років було виявлено, що якщо з водоростей вилучити сірку, вони вироблятимуть водень замість кисню, як під час звичайного фотосинтезу.

Біоводень може вироблятися в біореакторах, які використовують іншу сировину, найчастіше цією сировиною є відходи. Цей процес здійснюється бактеріями, що поглинають вуглеводні та виділяють водень і вуглекислий газ. Є кілька способів подальшого ізолювання  $\text{CO}_2$ , в результаті чого залишається лише водень.

#### 4.1.2 Електроліз з біокатализаторами

Крім звичайного електролізу, можливий також електроліз з використанням мікробів. При електролізі з біокатализаторами водень утворюється внаслідок проходження через мікробний паливний елемент, також можуть використовуватись різноманітні водні рослини. До них відносяться родини *Glyceria*, *Spartina*, рис, помідори, люпин, водорості.

#### 4.1.3 Електроліз води

Водень може вироблятися електролізом за високого тиску або електролізом води за низького тиску. У сучасних ринкових умовах 50 кВт / год електроенергії, витраченої на виробництво одного кілограма стисненого водню, коштують приблизно стільки ж, скільки водень, вироблений за 8 центів/kWh. Ціновий еквівалент пояснюється тим, що більшість водню виробляється з викопних видів палива, які ефективніше використовувати для виробництва хімічного продукту безпосередньо, ніж для виробництва електроенергії і подальшого електролізу. Так чи інакше, головним завданням водневої енергетики є отримання водню з інших джерел, тож в майбутньому планується не використовувати викопне паливо як сировину.

#### 4.1.4 Електроліз за високого тиску

Електроліз за високого тиску – це електроліз води, при якому вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ) розкладається на кисень ( $\text{O}_2$ ) і водень ( $\text{H}_2$ ), внаслідок пропускання електричного струму через воду. Різниця між таким електролізером і звичайним, полягає у тому, що водень виводиться під тиском близько 120-200 бар. При стисканні водню в електролізаторі потреба у зовнішньому компресорі водню зникає, середнє споживання енергії внутрішнім компресором становить близько 3% [10].

#### 4.1.5 Електроліз за високих температур

Водень може бути отриманий в процесі високотемпературного електролізу (НТЕ), що забезпечується енергією у вигляді тепла та електроенергії. Оскільки частина енергії в НТЕ – теплова, менша кількість енергії потребує подвійного перетворення (з тепла в електрику, а потім в хімічну форму), тому на виробництво кілограму водню витрачається набагато менше енергії.

В той час як атомна електроенергія може бути використана для електролізу, тепла ядерна енергія може застосовуватись безпосередньо для розщеплення води на кисень і водень. Розігрітий до високих температур (950-1000 ° C) газ у ядерному реакторі може розкласти воду на кисень і водень термохімічним шляхом через використання ядерної теплової енергії. Дослідження можливостей високотемпературних ядерних реакторів можуть зрештою привести до організації виробництва водню, яке буде конкурентоспроможним з виробництвом, що базується на перетворенні природного газу. General Atomics передбачає, що водень, вироблений у високотемпературному газовому реакторі (ВТГР) коштуватиме \$ 1.53/кг. У 2003 році водень, одержаний переробкою природного газу, коштував \$ 1.40/кг. В перерахунку на вартість природного газу у 2005 році, водень коштує \$ 2.70/кг.

Високотемпературний електроліз проводився в лабораторії, з витратами 108 МДж теплової енергії на кілограм водню, але не в промислових масштабах. Крім того, в результаті цих процесів одержується низькоякісний «промисловий» водень, який є непридатним для використання в паливних елементах.

#### 4.1.6 Фотоелектрохімічне розщеплення води

Найчистішим способом отримання водню є той, що базується на використанні електроенергії, виробленої фотоелектричними системами. Вода розкладається на водень і кисень шляхом електролізу — фотоелектрохімічного (ПЕС) процесу, який також називають штучним фотосинтезом. У фотоелектричній промисловості ведуться наукові дослідження, спрямовані на розвиток вискоєфективної технології мультиперехідних елементів [11].

#### 4.1.7 Концентрація теплової сонячної енергії

Для розкладання води на кисень і водень необхідні дуже високі температури. Щоб процес протікав за нижчих температур, необхідний каталізатор. Нагрівання води може

відбуватись за рахунок концентрації сонячної енергії. Hydrosol-2 — це 100 кіловатний експериментальний завод на Plataforma Solar de Almería в Іспанії, який нагріває воду до необхідних 800—1200 ° C за допомогою сонячного світла. Hydrosol II введений в експлуатацію з 2008 року. Розробка цього 100 кіловатного експериментального заводу базується на модульній концепції. Отже, цілком можливо, що діапазон дії цієї технології буде розширений до мегават шляхом збільшення кількості реакторних блоків і з'єднання заводу з геліостатними полями (поля дзеркал, що автоматично орієнтуються на сонце) відповідного розміру.

#### 4.1.8 Фотоелектрокаталітичне виробництво

Метод, вивчений Томасом Нанном і його командою в Університеті Східної Англії, складається з золотого електрода, вкритого шарами наночасток фосфіду індія (InP). Вони

ввели залізо-сірчаний комплекс в шари покриття, внаслідок чого після занурення у воду і опромінення світлом під невеликим електричним струмом, вироблявся водень з ККД 60% .

#### 4.1.8 Термохімічне виробництво

Є більш ніж 352 термохімічних цикла, які можуть використовуватись для розкладання води. Близько десятка з них (наприклад, цикл оксиду заліза, цикл церій (IV)- церій(III) оксид, цикл цинк — цинк-оксид, сульфур-йодний цикл, мідно-хлорний і гібридний сульфурний цикл) зараз досліджуються і знаходяться на фазі випробування з метою одержання водню і кисню з води за допомогою теплової енергії та без використання електрики. Ці процеси можуть бути ефективнішими, ніж електроліз за високих температур, діапазоні ефективності від 35% — 49% LHV. Термохімічне виробництво водню з використанням хімічної енергії вугілля або природного газу, як правило, не розглядається, бо безпосередньо хімічний спосіб є ефективнішим.

## 4.2 Особливості електролізерного виробництва водню

Вперше електролітичне розкладання води на кисень і водень було здійснено в 1800 р, а промислове освоєння цього методу почалося з 1888 р, коли стали доступні генератори постійного струму. Електроліз води є найбільш перспективною технологією отримання водню в майбутньому, хоча в даний час через високу вартість частка цього методу в світовому виробництві водню не перевищує 5% . Найбільш привабливими особливостями електролізної технології є екологічна чистота. Можливість створення установок з широким діапазоном продуктивності (від декількох літрів до сотень м<sup>3</sup> водню на годину), простота експлуатації і зручність в роботі, висока чистота виробленого водню і наявність цінного продукту — газоподібного водню. Метод знайшов широке застосування.

З різних методів розкладання води (електрохімічний, термічний, термохімічний, біохімічний, фотохімічний та ін.) технічно найбільш розроблений електролітичний метод, який дозволяє виробляти водень з корисним використанням електричної енергії приблизно 70%. При подальшому вдосконаленні процесу теоретично можливе збільшення цього показника до 80%, а при високотемпературному електролізі до 80-90 %.

В даний час існують три способи реалізації електролізної технології виробництва водню, що відрізняються типом використовуваного електроліту і умовами проведення електролізу.

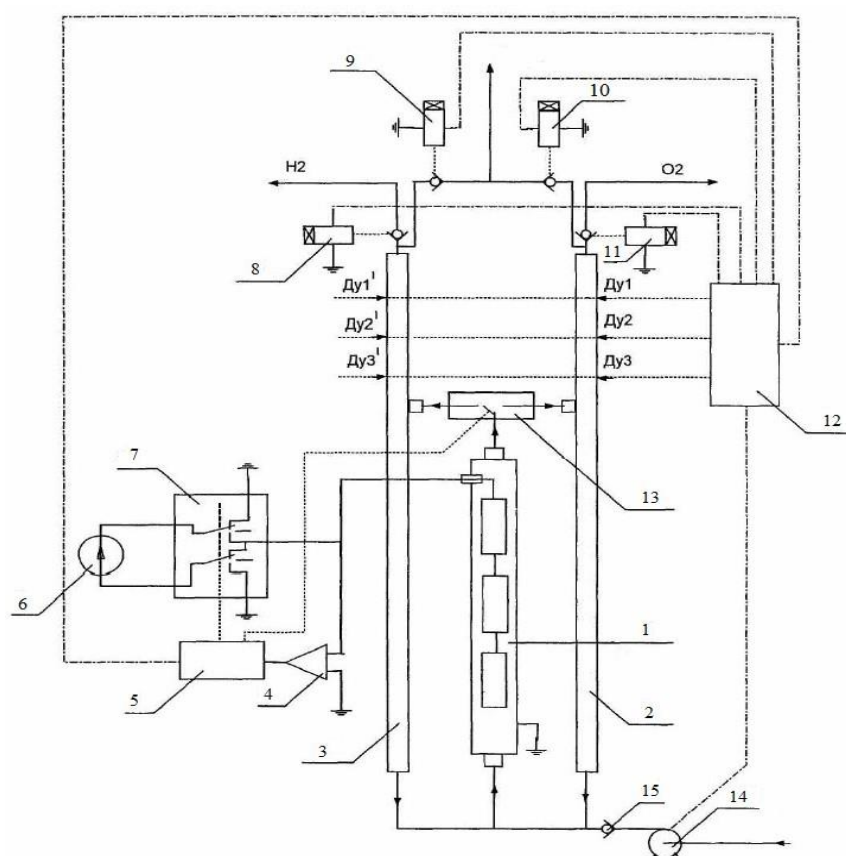
Таблиця 4.1 - Способи реалізації електролізної технології виробництва водню

Тип електролізера	Енерговитрати, м <sup>3</sup> /(кВт·год)	Температура, К	Продуктивність Н <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /год	Тиск, МПа	ККД, %
Лужний	4,5-5,5	320-370	до 500	0,1-5	70
З твердим полімерним електролітом (ТПЕ)	3,5-4,5	350-370	до 100	0,1-15	90
З твердим оксидним електролітом	2,5-4	1070-1270	-	0,1-3	85

Лужний електроліз - процес проходження електричного струму через розчин електроліту (20-30% розчин КОН або NaOH) від анода до катода, внаслідок чого на них відповідно утворюються гази водень і кисень. Особливість процесу лужного електролізу-можливість працювати в широких межах навантаження (починаючи з 20% від номінальної потужності). Основними виробниками є: Stuart IMET, the Electrolyser Corporation Ltd, Norsk Hydro.

Технології отримання водню, що базуються на процесах розкладання води шляхом електролізу, широко застосовуються в різних областях сучасної техніки. Порівняно з іншими методами отримання водню електроліз відрізняється простою технологічної схеми, доступністю вихідної сировини і відносною легкістю обслуговування енергетичних установок. Істотним недоліком електрохімічного методу отримання водню є велика енергоємність процесу розкладання води [12].

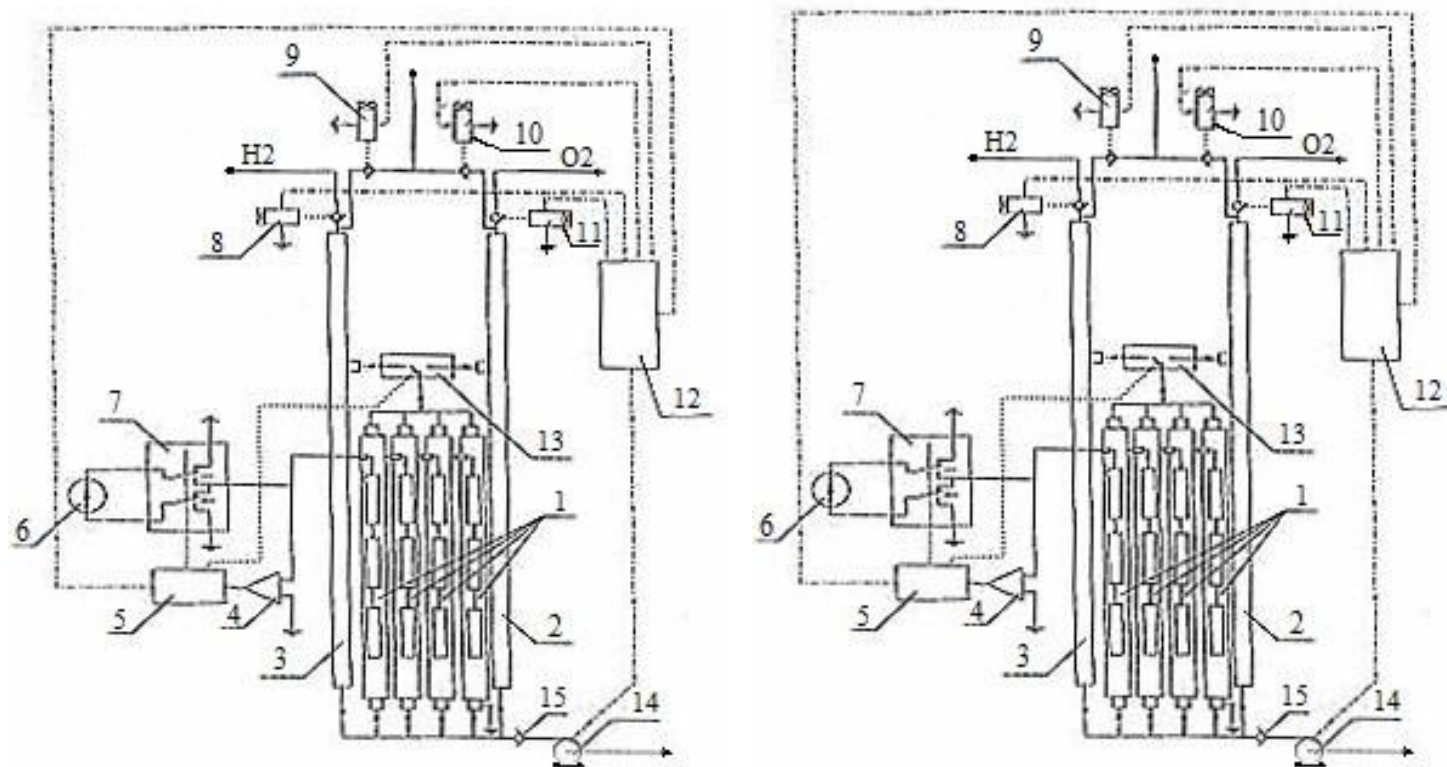
На рис. 4.1 та 4.2 наведено принципову схему роботи одномодульної і багатомодульної електролізної установки для реалізації способу із чотирма послідовно підключеними модулями.



- 1 – електролізний модуль; 2, 3 – кисневий і водневий сепаратори; 4 – компаратор;  
 5 – таймер; 6 – джерело струму; 7 – перемикач полярності; 8, 11 – водневий і кисневий клапани;  
 9, 10 – електромагнітні клапани з'єднання з атмосферою; 12 – блок керування;  
 13 – електромагнітний перемикач газорідних потоків; 14 – живильний насос;  
 15 – зворотний клапан

Рисунок 4.1 - Принципова схема роботи одномодульної електролізної установки





- 1 – електролізний модуль; 2, 3 – кисневий і водневий сепаратори; 4 – компаратор;  
 4 – таймер; 6 – джерело струму; 7 – перемикач полярності; 8, 11 – водневий і кисневий  
 клапани; 9, 10 – електромагнітні клапани з'єднання з атмосферою; 12 – блок керування;  
 13 – електромагнітний перемикач газорідинних потоків; 14 – живильний насос;  
 15 – зворотний клапан

Рисунок 4.2 - Принципова схема роботи чотирьохмодульної електролізної установки

Спосіб одержання водню реалізується в одномодульній (рис. 4.1) і чотирьохмодульній (рис. 4.2) електролізній установці, що містить чотири електролізні секції, кожна з яких включає підключені послідовно в одному блоці установлені вертикально чотири електролізні модулі 1 з пасивними та активними електродами. Секції електролізної установки із блоками модулів з'єднані через перемикач полярності 2 із джерелом струму 3 і через компаратор 4 і таймер 5 із блоком керування 6. Таймер 5 також підключений до перемикача полярності 2 і електромагнітного перемикача 7 газорідинних потоків, водневий і кисневий клапани 8, 9 якого з'єднані відповідно з вихідними штуцерами водневого і кисневого сепараторів 10, 11, оснащених датчиками рівня рідини. Сепаратори 10 і 11 з'єднані з блоком послідовно підключених електролізних модулів 1 електролізної установки та живильним насосом 12. Вихідні штуцери сепараторів 10 і 11 через електромагнітні клапани 8 і 9 з'єднані з блоком керування 6 і підключені відповідно до водневої і кисневої газових магістралей споживачів. У системі встановлені клапани 13 і 14, що з'єднують сепаратори 10 і 11 з атмосферою, і зворотний

клапан 15 для перекриття лінії подачі рідини.

Робота електролізної установки для одержання водню та кисню високого тиску регулюється блоком керування 6. В момент відкриття зворотного клапана 15 клапани 13 і 14, що з'єднують сепаратори 10 і 11 з атмосферою, відкриті, а клапани 8 і 9 на лініях подачі водню і кисню закриті. Живильним насосом 12 здійснюють подачу в систему електролізної установки робочого розчину електроліту із заповненням модулів до рівня спрацьовування датчиків рівня, за сигналом з яких блок керування 6 відключає живильний насос 12 і закриває зворотний клапан 15.

Таким чином, у кожному з підключених у послідовне електричне коло секцій електролізних модулів відбувається електрохімічне розкладання за циклічної подачі знакозмінного потенціалу на активні і пасивні електроди. Це забезпечує можливість здійснення розподільного в часі почергового генерування одного з газів на пасивному електроді з одночасним оборотним поглинанням іншого активним електродом. Процес генерації газів протікає з послідовними водневим і кисневим напівциклами [12].

Під час проведення водневого циклу таймер 5 переводить перемикач потоку 2 у положення з'єднання водневого сепаратора 10 із секціями електролізних модулів 1, а перемикач полярності 7 – у положення відповідного виділення водню. На пасивні електроди модулів 1 подається від'ємний потенціал, і вони стають катодами, а на активні – позитивний потенціал, і вони стають анодами. За такої умови на катодах виділяється водень, що надходить через перемикач потоку 2 у водневий сепаратор 10 і далі через відкритий електромагнітний клапан 8 у водневу лінію споживачеві. Водночас виділений на анодах кисень поглинається і хімічно зв'язується з активною масою активних електродів. Виділення водню триває, доки не окислиться вся активна маса електродів. Водневий цикл супроводжується ростом напруги на електродах, що контролюється компаратором 4 і підтримується у межах 0,3–0,5 В. У разі досягнення напругою величини відповідної витрати електрохімічної ємності активного електрода (0,5 В) компаратор 4, через таймер 5, переводить перемикач полярності 2 у знеструмлений стан на час дегазації електроліту для знеструмлення електродів і повної дегазації з електроліту від залишків генерованого у попередньому циклі газу. Перемикач потоку 2 залишається у стані підключення секцій електролізера 1 до водневого сепаратора 10. Після закінчення часу дегазації таймер 5 переводить перемикач потоків 7 у положення підключення секцій електролізера до кисневого сепаратора 6, перекидає перемикач полярності 2 на протилежну полярність, що відповідає наступному кисневому циклу. За такої умови на пасивні електроди комірки 1 подається позитивний потенціал, а на активні – від'ємний. Пасивні електроди стають анодами, і на них відбувається виділення кисню, що через перемикач потоків 2 направляється в кисневий сепаратор 11 і далі через відкритий електромагнітний клапан 9 у кисневу лінію споживачеві.

Водночас на активному електроді модулів відбувається регенерація (відновлення) окисненої активної маси. Процес виділення кисню відбувається за напруги на електродах від 1,4 до 1,5 В і триває до закінчення електрохімічної регенерації активної маси. За такої умови пов'язаний із блоком керування 6 компаратор 4, досягнувши величини 1,4 В через таймер 5 переводить перемикач полярності 2 в знеструмлений стан на час дегазації, протягом якого перемикач потоків 7 залишається в контрольному положенні кисневого циклу. Далі процес зміни циклів триває в такому ж порядку.

Впорядкований рух іонів в провідних рідинах відбувається в електричному полі, яке створюється електродами - провідниками, з'єднаними з полюсами джерела електричної енергії. Катодом при електролізі називається негативний електрод, анодом - позитивний. Позитивні іони - катіони (іони металів, водневі іони, іони амонію та ін.) - рухаються до катода, негативні іони - аніони (іони кислотних залишків і гідроксильної групи) - рухаються до анода.

Реакції, що відбуваються при електролізі на електродах називаються вторинними. Визначальними є реакції дисоціації в електроліті. Поділ реакцій на первинні і вторинні допомогло Майклу Фарадею встановити закони електролізу.

Установки «ГРАСІС» (рис.4.3, рис.4.5) по вилученню водню з технологічних потоків використовують новітні досягнення мембранної і адсорбційної технологій і відкривають нові можливості для підвищення ефективності хімічних, нафтохімічних виробництв і підприємств нафтопереробки. Вступ в силу нового технічного регламенту і майбутній перехід до нових класів палива зі зниженим вмістом сірки і ароматичних вуглеводнів пред'являють все більш високі вимоги до якості водню, що використовується в процесах гідроочищення і процесі ізомеризації, роль якого останнім часом зростає. Неухильне підвищення вимог до чистоти і повноти вилучення водню відбувається і в хімічній і нафтохімічній галузях [13].

У зв'язку з цим компанія «ГРАСІС» постійно працює над вдосконаленням технології вилучення водню з тим, щоб запропонувати кожному клієнту рішення, повною мірою задовольняє його потребам у водні і підвищує ефективність роботи водневого кільця підприємства.

Мембранні газорозділювальні установки дозволяють отримувати збагачений до 92-99% за воднем газовий потік, який можна повернути у виробництво. За рахунок підвищення концентрації водню витрата рециркулюючого ВСТ значно зменшується, що забезпечує істотну економію ресурсу технологічних компресорів. Водневі установки «ГРАСІС», що працюють за принципом мембранного поділу, дозволяють концентрувати водень в скидних, залишкових, паливних та інших газах до 99,5% при продуктовому потоці до 50 000 м<sup>3</sup> / год.

Сучасні мембранні водневі установки складають гідну альтернативу криогенним і адсорбційним системам. У багатьох випадках мембранні установки концентрування водню

знаходять застосування там, де використання обладнання на основі інших технологій неможливо або з техніко-економічної точки зору неефективно.

Адсорбційні установки «ГРАСІС», що працюють на надкоротких циклі, призначені для виробництва високочистого водню з газових потоків. СКЦА-установки «ГРАСІС» дозволяють отримувати водень з чистотою до 99,9995% при мінімальному падінні тиску в процесі поділу (рис.4.5).

Технологія понадкороткоциклової адсорбції - саме помітне досягнення за останні роки в області поділу газів. Завдяки появі цієї технології вдалося вирішити безліч проблем, властивих КЦА-установкам з виробництва водню.



Рисунок 4.3 - Мембранна установка для виробництва водню ГРАСІС[11]

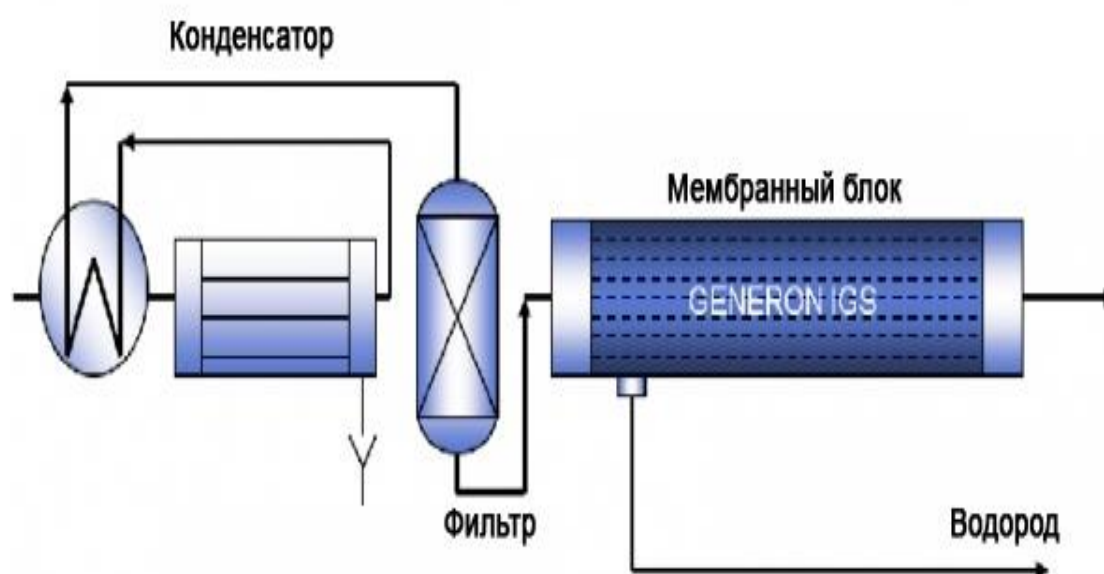


Рисунок 4.4 - Схема отримання водню мембранною установкою ГРАСІС [11]



Рисунок 4.5 - Адсорбційна установка для виробництва водню ГРАСІС

Таблиця 4.2 – Загальні технічні характеристики Адсорбційної установки для виробництва водню ГРАСІС [13]

Назва параметра	Значення	
Параметри водню на виході із установки		
Чистота водню, %	98-99,995	
Об'ємний вихід газової суміші, м <sup>3</sup> /год	10-50 000	
Тиск, атм	5-55	
Точка роси, °С	-40...-60	
Температура навколишнього середовища		
Під час роботи, °С	-20...+40	
Під час зберігання, °С	-20... +50	
Ресурс роботи установки, тис. год.	70-120	
Виробництво Н <sub>2</sub> , м <sup>3</sup> /год	5	10
Енергоспоживання, кВт/Нм <sup>3</sup>	7,4	7,9

### 4.3 Розрахунок витрати водневого палива та підбір джерела генерування водню

Витрату водневого палива визначаємо за умов повного теплозабезпечення торгівельного центру за графіком навантаження, а саме  $Q_{ВТР} = 1850$  кВт. Цю кількість теплоти забезпечується спалюванням водню з теплотворною здатністю

$$Q_{н\ H_2}^p = 120 \text{ МДж/м}^3$$

Кількість водневого палива для системи теплозабезпечення ТРЦ, л/год, визначаємо за формулою (4.1)

$$b_{H_2}^V = \frac{Q_{ВТР}}{Q_{н\ H_2}^p \cdot \eta} \quad (4.1)$$

$$b_{H_2}^V = \frac{Q_{ВТР}}{Q_{н\ H_2}^p \cdot \eta} = \frac{1850 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^3 \cdot 1,06} = 14,54 \text{ м}^3/\text{Год} = 14540 \text{ л/Год}$$

За даною витратою водню необхідно підібрати електролізер.

Для газозабезпечення воднем контактних теплогенераторів ТВАК було запропоновано декілька моделей фірми «Okay Energy». Підбір установки виробництва водню розглядався в першу чергу при максимальній продуктивності, мінімальному значенні споживання електроенергії та чистоті водню.

Для виробництва високоякісного водню генератор типу ОН7500 (Okay Energy) використовує воду і електроенергію. Наприклад базова установка генератора водню типу ОН7500 (Okay Energy) складається з генератора водню, блоку живлення, блоку управління, системи віддаленого контролю і сполучних кабелів.

Установка типу ОН7500 (Okay Energy) оснащена наступними елементами:

- газоаналізатор водню в атмосфері
- газоаналізатор водню в кисні
- ДБЖ (джерело безперебійного живлення)

Використання установок «Okay Energy» для виробництва водню зручно, ефективно і вигідно з економічної точки зору, так як дане обладнання поєднує в собі відмінні технічні та експлуатаційні характеристики, компактні розміри і автоматизацію всього процесу отримання водню. Одержуваний водень може бути повернутий в технологічний процес або відправлений на скраплення. Загальний вигляд установки для виробництва водню Okay Energy показано на рис. 4.6 та рис. 4.7 [14].





Рисунок 4.6 - Установка типу ОН2000 «OKAY ENERGY»



Рисунок 4.7 - Установка типу ОН7500 «OKAY ENERGY»

Таблиця 4.3 – Загальні технічні характеристики установок виробництва водню Oka Energy [14]

Номер моделі	ОН2000	ОН3000	ОН5500	ОН7500	ОН10000
Вимоги до напруги змінного струму (В)	380	380	380	380	380
Фази	3	3	3	3	3
Номінальна потужність (кВт / год)	6	9	17	23	31
Максимальна продуктивність по водню (л / год)	2000	3000	5500	7500	9700
Максимальний робочий тиск (кг/см <sup>2</sup> )	2	2	2	2	2
Максимальна витрата води (л / год)	0,9	1,8	2,8	4	5,6
Подача води	Авто	Авто	Авто	Авто	Авто
Розміри Д * Ш * В (м)	1,07*0,67*1	1,07*0,67*1,5	1,2*0,67*1,7	1,35*0,67*1,8	1,5*0,67*1,8
Вага брутто, кг	280	330	396	552	610

Проаналізувавши всі дані моделі електролізерів було обрано два електролізера типу ОН7500 фірми «Oka Energy» продуктивністю 7500 л/год.

#### 4.4 Принципова схема живлення джерела виробництва водню

Для зменшення собівартості виробництва водневого палива було використано нетрадиційне джерело енергії – сонячні батареї.

Сонячні батареї забезпечують більшу автономність і незалежність від ліній електропередач. Сонячна електрика має багато переваг: - це чисте, тихе й надійне джерело



енергії. Сонячні модулі складаються з кремнієвих фотоелементів. Такий елемент являє собою «сендвіч», в якому пластинка напівпровідника знаходиться між струмопровідними шарами.

Переваг сонячних батарей досить багато, до них можна віднести:

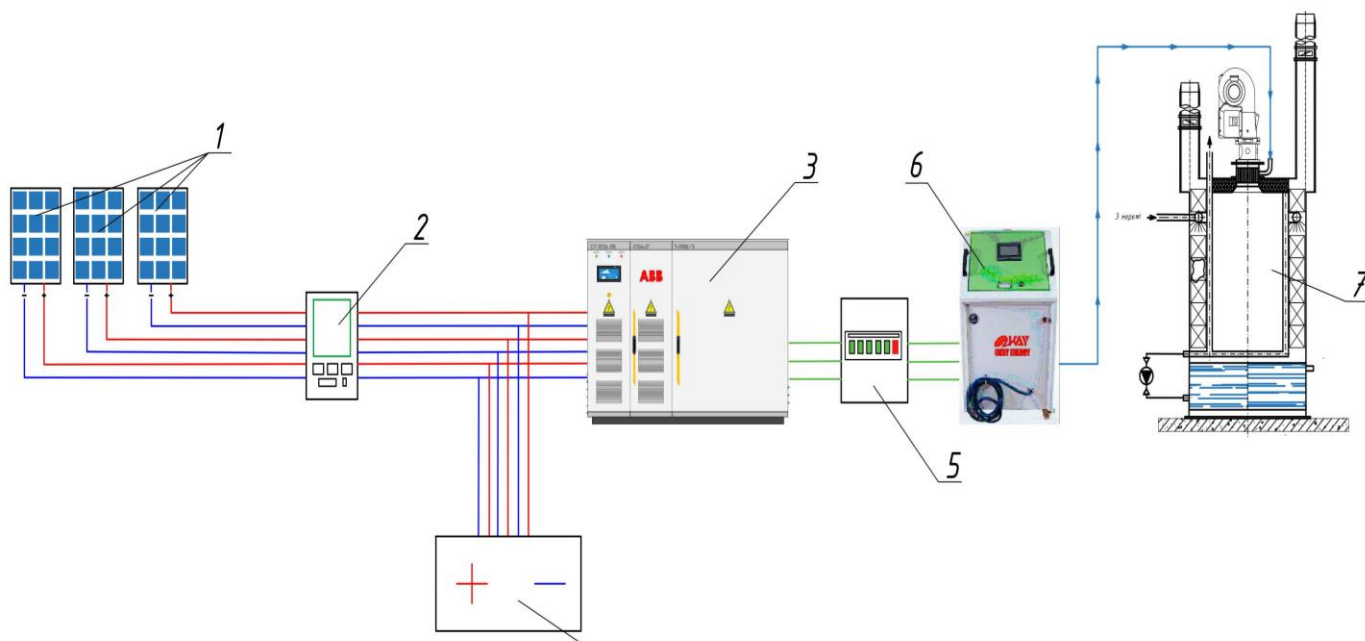
- Повна енергетична незалежність;
- Автономність системи;
- Невичерпний ресурс;
- Екологічність;
- Простота в обслуговуванні.

Повна енергетична незалежність полягає у незалежності від центральної подачі електроенергії. Ця перевага є однією з найголовніших, адже сьогодні Україна потерпає економічну кризу, що сильно відображається на тарифах енергетики.

Автономність системи – це перевага, що демонструє повну самостійність в роботі сонячних панелей. Іноді потрібне сервісне обслуговування, але ж будь-яке сучасне обладнання його потребує. Ця перевага сонячних панелей позначає, що втручання людських сил в роботу обладнання зовсім непотрібне.

Екологічність, одна з головних переваг сонячних панелей, адже останні роки життя нашої планети визначаються, як катастрофічними з точки зору екології. Тому поєднання екологічно чистого джерела теплозабезпечення – водневого теплогенератора за умов забезпечення його водневим паливом використовуючи сонячні панелі є досить важливим та необхідним не лише державі, а й планеті Земля.

Принциповою схемою живлення джерела виробництва водню наведено на рис. 4.8.



1 – сонячні батареї; 2 - контролер; 3 - інвертор; 4- акумулятор; 5 - лічильник;  
6 - джерело виробництва водню  $H_2$ ; 7- контактний теплогенератор ТВАК;  
Рисунок 4.8 – Принципов схема живлення джерела виробництва водню  $H_2$

Сонячні батареї - 1 виробляють постійний струм, контролер - 2 спрямовує струм на інвертор – 3 та заряджає акумулятор – 4. Інвертор перетворює постійний струм акумуляторів (від 12 до 240V DC) у змінний (220/380V 50Hz), придатний для живлення джерела виробництва водню - 6. Лічильник – 5 дає змогу вимірювати та вести облік електроенергії, що споживається джерелом виробництва водню  $H_2$ . Водень  $H_2$ , який виробляється поступає в теплогенератор типу ТВАК - 7, де спалюється і таким чином опалює ТРЦ. Така система може поєднуватись з мережею, але має змогу працювати і без неї.

## 4.5 Основні техніко-економічні розрахунки системи теплозабезпечення з використанням ТВАК

### 4.5.1 Теплозабезпечення ТРЦ на базі газової котельні

Розглянемо варіант, коли торговельний центр «OASIS» опалюється газовими котлами які підключені до газової магістралі.

Витрата природного газу за годину для теплозабезпечення торговельного центру,  $m^3/год$  визначаємо за формулою

$$b_{np.газ} = \frac{N}{Q_H^P \cdot \eta} \quad (4.2)$$

де  $Q_H^P = 31,8 \text{ МДж /м}^3$  - нижча питома теплота згоряння природного газу;

$N$  - теплова потужність джерела теплопостачання, кВт;

$\eta$  - ККД газового котла;

$$b_{\text{пр.газ}} = \frac{1850 \cdot 10^3}{31,8 \cdot 10^6 \cdot 0,94} = 0,0619 \text{ м}^3/\text{с} = 222,84 \text{ м}^3/\text{год}$$

Вартість теплозабезпечення за допомогою газового котла, грн /год, визначаємо за формулою

$$C_{\text{пр.газ}} = b_{\text{пр.газ}} \cdot C_{\text{нас}} \quad (4.3)$$

де  $C_{\text{нас}} = 9,4 \text{ грн /м}^3$  - вартість природного газу;

$$C_{\text{пр.газ}} = 222,84 \cdot 9,4 = 2094,7 \text{ грн /год}$$

Питома вартість тепловиробництва газовим котлом за опалювальний сезон, грн /оп.сезон, визначаємо за формулою

$$C_{\text{пр.газ}}^{\text{сезон}} = C_{\text{пр.газ}} \cdot \tau_{\text{оп}} \quad (4.4)$$

де  $\tau_{\text{оп}} = 5000$  годин – термін опалювального сезону;

$$C_{\text{пр.газ}}^{\text{сезон}} = 2094,7 \cdot 5000 = 10\,473\,500 \text{ грн /оп.сезон}$$

Для порівняння результатів розрахунку занесемо їх до таблиці 4.4.

#### 4.5.2 Теплозабезпечення ТРЦ на базі водневого контактного теплогенератора ТВАК

Джерелом виробництва водню використаємо два електролізери типу ОН7500 «ОКАУ ENERGY». Максимальна об'ємна продуктивність по водню однієї установки складає 7500 л/год., номінальна потужність 23 кВт\*год.

Електролізер працює 8 годин в нічний час за тарифом 0,78 грн/(кВт\*год) та 16 годин в день за тарифом 1,56 грн/(кВт\*год). Таким чином за добу вартість електроенергії для виробництва водню, грн/добу, складає

$$C_{\text{добу}}^{\text{ел.ен.}} = (\tau_{\text{ніч}} \cdot C_{\text{ніч}}^{\text{ел.ен.}} + \tau_{\text{день}} \cdot C_{\text{день}}^{\text{ел.ен.}}) \cdot N \cdot P \cdot 24 \quad (4.5)$$

де  $N$  - кількість електролізерів;

$P$  - номінальна потужність одного електролізера;

$\tau_{\text{ніч}}$  - кількість годин при роботі електролізера у нічний період, год;

$\tau_{\text{день}}$  - кількість годин при роботі електролізера у день, год;

$C_{\text{ніч}}^{\text{ел.ен.}}$  - вартість електричної енергії у нічний період за пільговим тарифом, грн/(кВт\*год);

$C_{\text{день}}^{\text{ел.ен}}$  - вартість електричної енергії за звичайним тарифом, грн/(кВт\*год);

$$C_{\text{добу}}^{\text{ел.ен.}} = (8 \cdot 0,78 + 16 \cdot 1,56) \cdot 2 \cdot 23 \cdot 24 = 34\,444,8 \text{ грн/добу}$$

Питома вартість опалення за опалювальний сезон, грн/оп.сезон, становить

$$C_{H_2}^{\text{сезон}} = C_{\text{добу}}^{\text{ел.ен.}} \cdot \frac{\tau_{\text{оп}}}{24} \quad (4.5)$$

$$C_{H_2}^{\text{сезон}} = 34444,8 \cdot \frac{5000}{24} = 7\,176\,000 \text{ грн /оп.сезон}$$

Для порівняння результатів розрахунку занесемо їх до таблиці 4.4.

В таблиці 4.4. наведено порівняння основних величин газового котла та контактного теплогенератора ТВАК. Всі параметри в таблиці розраховані при однакових початкових умовах для обох агрегатів.

Таблиця 4.4 – Порівняння параметрів теплозабезпечення ТРЦ на базі водневого контактного теплогенератора ТВАК та газової котельні

Параметр	ТВАК	Газова котельня
1	2	3
Теплова потужність N, кВт	1850	
Витрата ел. енергії, кВт*год	46	-
ККД агрегату, %	106	94
Вартість тепловиробництва, грн/(кВт*год)	1435,2	2094,7
Опалювальна площа, м <sup>2</sup>	14 481	
Період опалювального сезону, год	5000	
Питома вартість тепловиробництва за опалювальний сезон, грн /оп.сезон	7 176 000	10 473 500

Продовження таблиці 4.4

1	2	3
Економія коштів за сезон після терміну окупності, грн	3 297 500	-
Термін окупності, рік	2,8	-
Температура води, °С: -на вході -на виході	45 90	45 90
Тиск води у агрегаті, атм	3	атмосферний
Концентрація шкідливих речовин, мг/м <sup>3</sup> : -оксидів азоту NO <sub>x</sub> -оксиду вуглецю CO	-	NO <sub>x</sub> = 1 мг/м <sup>3</sup> CO = 0 мг/м <sup>3</sup>

## ВИСНОВКИ

1 Робота присвячена розробці проекту системи теплозабезпечення торгівельного центру загальною площею 14 481 м<sup>2</sup> за рахунок застосування водневого контактного теплогенератора типу ТВАК у якості джерела автономного теплопостачання.

2 Для теплозабезпечення центру розроблено принципову теплову схему з використанням двох теплогенераторів тепловою потужністю 1 МВт кожен.

3 В якості джерела генерування водню було обрано два електролізера типу ОН7500 фірми «Oxay Energy» продуктивністю 7500 л/год кожен.

4 Застосування водневого палива у даній схемі теплозабезпечення розглядається як акумулювання електричної енергії у нічний час для виробництва водневого палива у електролізерах з наступним його використанням у теплогенераторі для теплозабезпечення ТРЦ.

5 ТВАК та електролізери розташовані у окремому приміщенні на позначці +16.500 із дотриманням вимог техніки безпеки та пожежної безпеки,

6 Застосування водневого палива у теплогенераторі контактного типу ТВАК суттєво покращує екологічні показники довкілля.

7 Застосування ТВАК має певні переваги перед іншими джерелами тепло-генерування оскільки має невеликі розміри й вагу, є високоефективним та екологічно чистим джерелом генерування теплоти, може працювати певний час без електроживлення оскільки має добовий запас водню, що акумульований у електролізері.

8 Здійснено техніко-економічний розрахунок порівняння теплозабезпечення ТРЦ за допомогою ТВАК та газової котельні. За підсумками визначено річну економію у розмірі 3 297 500 грн/оп.сезон, яка дозволяє отримати термін окупності 2,8 року.

9 Розроблено усі необхідні заходи з охорони праці, техніки безпеки та пожежної безпеки роботи системи теплопостачання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Соснин Ю.П. Контактные водонагреватели : учебное пособие, 2-е изд./ Ю.П. Соснин – Москва : «Стройиздат», 1974. – 150с.
2. Варламов Г.Б. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії: навч. посібник / Г.Б. Варламов, Г.Н. Любчик, В.А. Маляренко. – Київ : ІВЦ Видавництво Політехніка, 2003.-232с.: іл.
3. Варламов Г.Б. Модернізація існуючої котельні з використанням контактного теплогенератора КАОМ / Г.Б. Варламов, М.Д. Очеретянко, С.Л. Касянчук. // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : матеріали XIV Міжнародна науково – практична конференція аспірантів, магістрантів та студентів, Київ, 18-21 квітня 2016 року.– С.176.
4. Котлер В.Р. Экологические проблемы промышленно-отопительных котлов, работающих на природном газе: навч. посібник / В.Р. Котлер, С.Е. Беликов. – Київ : Теплоэнергетика.- 1999. - № 8.- с. 37-42.
5. Пат. Україна, № u12385. Спосіб мікрофакельного спалювання водневого палива: патент / Г.Б. Варламов, Д.Г. Варламов, К.О. Романова [та ін.], Київ. КПП. – заявл. 05.12.2012.
6. Использование контактных теплогенераторов нового поколения для теплопроизводства. Восточно-европейский журнал передовых технологий / Г.Б. Варламов, Е.А. Романова, О.П. Дашенко [та ін.] // 2016 - №6, - С. 52-58.
7. Краснощок Е. А. Задачник по теплопередаче: задачник, 2-е изд./ Е.А. Краснощок, А.С. Сукомел – Москва : «Энергия», 1969. – 264с.
8. Боженко М.Ф. Джерела тепlopостачання та споживачі теплоти : навч. посіб. / М.Ф. Боженко, В.П. Сало. – Київ : ІВЦ „Видавництво „Політехніка”, 2004. – 192 с.
9. Расчет выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах промышленно – отопительных котельных: Методические указания к выполнению дипломного и курсового проектов по дисциплине «Источники и системы теплоснабжения» для студентов специальности «Промышленная теплоэнергетика» / Київ. КПП; уклад.: Сост. А. Н. Алабовский, Ю. В. Хоренженко. – Київ: 1992. – 32с.
10. Неисчерпаемая энергия. Кн.4. Ветроводородная энергетика: учебное пособие. / В.С. Кривцов, В.И. Кривцова, А.М. Олейников [и др.] – Харьков- Севастополь : ХАИ/СНТУ, 2007. – 680 с.
11. Комп’ютерний екологічний аудит промислової зони – структурний елемент системи екологічного управління : навч. посіб. / Г.М. Єлізаренко, І.В. Недін, В.Г. Сліпченко [та ін.] – Харків : Енергетика: економіка, технології, екологія, 2002, №2, с. 27-30.

12. Основні принципи роботи і алгоритм керування безмембранним електролізером високого тиску / В.В. Соловей, А.Л. Котенко, І.О. Воробйова [та ін.] // Проблеми машинобудування. – 2018. - №4 – С.21.

13. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.grasys.ru/products/gas/hydrogen/membrane/>

14. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <https://www.okayenergy.com/oxyhydrogen-combustion/oh7500.html>



## Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан теплоенергетичного  
факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського

Є.М. Письменний

13 березня 2020р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор  
ТОВ «Новий Інжиніринг»

Плевако А.М.

13 березня 2020р.

## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на науково-дослідну роботу

**«Зменшення собівартості теплозабезпечення торгівельного центру «OASIS» та  
підвищення екологічних показників за рахунок застосування водневого контактного  
теплогенератора»**

**1. Термін виконання роботи**

Початок – 13.03.2020 р.

Закінчення – 08.05.2020 р.

**2. Обґрунтування для виконання роботи**

На даний момент у промисловості та комунальній сфері України дуже гостро повстало питання економії енергоресурсів у зв'язку із стрімким подорожчанням енергоресурсів.

Виконання даної роботи пов'язано з необхідністю підвищення екологічних показників енерговиробництва та зменшення собівартості теплозабезпечення торгівельного центру за рахунок спалювання екологічно чистого водневого палива.

**3. Мета роботи**

Розробити заходи для зменшення собівартості теплозабезпечення торгівельного центру за умови підвищення екологічних показників за рахунок застосування контактного теплогенератора нового покоління який працює на водневому паливі. Застосувати сучасні технології спалювання водневого палива на базі мікрофакельного пальника. Виконати моделювання та оптимізацію теплових та аеродинамічних процесів у топці теплогенератора.

**4. Зміст основних етапів виконання роботи**

- 1) Визначення основних конструктивних та аеродинамічних характеристик контактного теплогенератора.
- 2) Розрахувати параметри та тепловий баланс теплогенератора.
- 3) Розробка принципової схеми живлення джерела генерування водню.
- 4) Моделювання процесу горіння в топці контактного теплогенератора.
- 5) Розрахунок основних параметрів мікрофакельного пальника дифузійного типу.

6) Виконати техніко-економічні розрахунки системи теплозабезпечення з використанням ТВАК.

7) Виконати графічний матеріал

- Креслення загального вигляду теплогенератора ТВАК;
- Креслення компоновки мікрофакельного пальника дифузійного типу;
- Креслення схеми живлення джерела генерування водню;
- Принципова схема теплозабезпечення ТРЦ на базі контактного водневого теплогенератора;

### **5. Матеріали, що подаються після закінчення роботи**

5.1. Магістерська дисертація.

5.2. Акт впровадження результатів.

### **6. Порядок розгляду і приймання роботи**

Результати роботи розглядаються на засіданні ЕК із захисту атестаційних робіт освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика» освітньо-наукової програми «Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження».

#### **Керівник роботи**

Зав.каф ТПТ ТЕФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

\_\_\_\_\_ Геннадій ВАРЛАМОВ  
«08» травня 2020 р.

#### **Виконавець**

Магістр гр. ТП-81мн,  
ТЕФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

\_\_\_\_\_ Дмитро ВОВЧЕНКО  
«08» травня 2020 р.

Додаток Б



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Генеральний директор  
ТОВ «Новий Інжиніринг»  
Плевако А.М.

« 8 » травня 2020

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

Результатів магістерської дисертації студента другого (магістерського)  
рівня вищої освіти ТЕФ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»

**Вовченка Дмитра Івановича**

Результати магістерської дисертації студента НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» Вовченка Д.І. за темою: **«Зменшення собівартості теплозабезпечення торгівельного центру «OASIS» та підвищення екологічних показників за рахунок застосування водневого контактного теплогенератора»** повністю відповідають Технічному завданню та використані для розробки, підготовки необхідної документації та техніко-економічних розрахунків системи теплозабезпечення центру з використанням ТВАК з метою планування практичної діяльності з питань зниження собівартості та зниження викидів шкідливих та парникових газів тепловиробництва

Головний спеціаліст центру

Шоленков М.А.

« 8 » травня 2020

## Додаток В

**СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ** Вовченка Дмитра Івановича  
(прізвище, ім'я, по-батькові студента)

№ п/з	Найменування праць	Рукописні або друківані	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друківаних аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5	6
1.	Особливості застосування водневого палива у контактному теплогенераторі	Друк	Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів, студентів, м. Київ, 23-26 квітня 2019 р. У 2 т. – К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – Т. 1, С.285	1 стор.	Варламов Г. Б. Цзе Ши
2.	Влияние конструктивных элементов на улучшение аэродинамических и тепловых характеристик в контактном теплогенераторе	Друк	VII Международная научно – практическая конференция: «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения» Астана, 16 марта 2019 р. /Подгот. Г.Т. Мерзадинова, Т.Б. Сулейменов, Т.Т. Султанов – Астана, 2019, С.366-369	4 стор.	Варламов Г. Б.
3.	Комплексні енерго-екологічні переваги застосування водневого палива	Друк	Робота на XVIII Всеукраїнський конкурс «Молодь - енергетиці України – 2018-2019: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків». Призер диплома II ступеня	44 стор.	-
4.	Застосування екологічно чистого водневого палива для теплозабезпечення котеджу	Друк	Робота на Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей у 2018/2019 н.р.	42 стор.	-



5.	Преимущества использования водородного топлива в системах теплообеспечения	Друк	VIII Международная научно – практическая конференция: «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения» Астана, 20 марта 2020 р. /Подгот. Г.Т. Мерзадинова, Т.Б. Сулейменов, Т.Т. Султанов – Астана, 2020, С. 263-267	5 стор.	Варламов Г.Б. Романова К.О.
6.	Застосування відновлювальних джерел енергії та водневого теплогенератора для зниження питомих витрат теплозабезпечення приватної будівлі	Друк	III Міжнародна наукова мультидисциплінарна конференція студентів та молодих учених «MODERN TECHNOLOGIES: IMPROVING THE PRESENT AND IMPACTING THE FUTURE» / («НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ПОКРАЩЕННЯ СЬОГОДЕННЯ ТА ВПЛИВ НА МАЙБУТНЄ») присвяченій 90-річному ювілею ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна, Дніпро, 27 листопада 2019 року, С.53	1 стор	Варламов Г.Б. Щипачова Д.С.

Автор

Д.І. ВОВЧЕНКО  
(ініціали, прізвище)

## Додаток Г

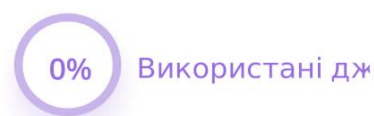
### Результати перевірки на плагіат



ПЗ ВОВЧЕНКО на плагіат 04.05.20

Завантажено: 05/04/2020 | Перевірено: 05/04/2020

● Matches ● Цитата ● Використані джерела ● Заміна символів



Matches

Веб джерела

33

1	<b>5fan.ru</b> <a href="http://5fan.ru/wievjob.php?id=42783">http://5fan.ru/wievjob.php?id=42783</a>	27.1%
2	<b>studfile.net</b> <a href="https://studfile.net/preview/5197727/page:3/">https://studfile.net/preview/5197727/page:3/</a>	11.62%
3	<b>studfile.net</b> <a href="https://studfile.net/preview/5197727/page:2/">https://studfile.net/preview/5197727/page:2/</a>	10.12%
4	<b>uchni.com.ua</b> <a href="https://uchni.com.ua/matematika/55201/index.html?page=2">https://uchni.com.ua/matematika/55201/index.html?page=2</a>	9.97%
5	<b>www.BiblioFond.ru</b> <a href="https://www.BiblioFond.ru/view.aspx?id=658386">https://www.BiblioFond.ru/view.aspx?id=658386</a>	7.84%
6	<b>stud.wiki</b> <a href="https://stud.wiki/physics/3c0a65635b3bd78b4c43a88521216c26_0.html">https://stud.wiki/physics/3c0a65635b3bd78b4c43a88521216c26_0.html</a>	7.64%
7	<b>knowledge.allbest.ru</b> <a href="https://knowledge.allbest.ru/physics/3c0a65635b3bd78b4c43a88521216c26_0.html">https://knowledge.allbest.ru/physics/3c0a65635b3bd78b4c43a88521216c26_0.html</a>	7.64%
8	<b>revolution.allbest.ru</b> <a href="https://revolution.allbest.ru/physics/00327462_0.html">https://revolution.allbest.ru/physics/00327462_0.html</a>	7.16%
9	<b>studfile.net</b> <a href="https://studfile.net/preview/5197727/page:7/">https://studfile.net/preview/5197727/page:7/</a>	6.55%
10	<b>uchni.com.ua</b> <a href="https://uchni.com.ua/matematika/55201/index.html?page=4">https://uchni.com.ua/matematika/55201/index.html?page=4</a>	6.16%